



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



LARISSA SOUSA LEITE

**ESTUDO DA ENERGIA DE FRATURAMENTO EM
CONCRETOS COM REAÇÃO EXPANSIVA**

Uberlândia, 2023

LARISSA SOUSA LEITE

**ESTUDO DA ENERGIA DE FRATURAMENTO EM
CONCRETOS COM REAÇÃO EXPANSIVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais de Construção e Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos.

Uberlândia, 2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L533
2023

Leite, Larissa Sousa, 1996-
Estudo da energia de fraturamento em concretos com
reação expansiva [recurso eletrônico] / Larissa Sousa
Leite. - 2023.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.506>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Santos, Antonio Carlos dos,
1968-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 294, PPGE				
Data:	04 de setembro de 2023	Hora de início:	09:10 h	Hora de encerramento:	12:15 h
Matrícula do Discente:	12112ECV025				
Nome do Discente:	Larissa Sousa Leite				
Título do Trabalho:	Estudo da energia de fraturamento em concretos com reação expansiva				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Avaliação da Deterioração de Dormentes: Diagnóstico, prognóstico e estimativa de vida útil				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Luiz Carlos de Almeida - UNICAMP, Eliane Betania Carvalho Costa - UFU e Antonio Carlos dos Santos, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Antonio Carlos dos Santos, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/09/2023, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos de Almeida, Usuário Externo**, em 05/09/2023, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/09/2023, às 18:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4797516** e o código CRC **096A0752**.

Aos meus pais, Reinaldo e Rosa, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me concedido força e saúde para realizar este trabalho. Agradeço também aos meus pais, Reinaldo e Rosa, meu porto seguro, por todo suporte e companheirismo mesmo eu estando longe de casa.

Ao prof. Dr. Antonio Carlos, meu muito obrigada pela orientação e paciência e também aos membros da banca examinadora, prof. Dr. Luiz Carlos e prof.^a Dr.^a Eliane, pelas contribuições ao trabalho. Agradeço à Vale S.A. pela oportunidade de participar do projeto “Avaliação da Deterioração de Dormentes: diagnóstico, prognóstico e estimativa de vida útil”, pelo financiamento e incentivo à pesquisa.

Às amigas construídas em Uberlândia, Maria Eduarda, Cristiane, Gabriel, Laisy, Nathália, Bruno, Ricardo, Rondinele, Pedro, Hubert, Marcos, Andressa, Alisson e Deodato, foi um prazer trabalhar com vocês e dividir os sufocos do dia a dia no laboratório. Às amigas de longa data, Yasmine, Kamilla, Josiane, Nayane e Roberta, que mesmo com a distância, se fazem presentes nos momentos felizes e difíceis.

Vocês foram indispensáveis para a realização deste trabalho, muito obrigada!

LEITE, L. S. **Estudo da energia de fraturamento em concretos com reação expansiva**. 117 f. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto apresentam importância técnica, econômica, ambiental e de segurança. Dentre os diversos tipos de manifestações patológicas que podem ocorrer em uma estrutura, têm-se a formação de etringita tardia, um tipo de ataque por sulfato, que ocorre quando o concreto no processo de hidratação atinge temperaturas maiores que 65 °C. Essa reação é expansiva e causa fissuração no elemento afetado. Tendo em vista que as fissuras podem comprometer a integridade estrutural e ser porta de entrada para outros mecanismos deletérios, é de extrema relevância a compreensão do desempenho do concreto nesta situação. Nesse sentido, a Mecânica da Fratura estuda o comportamento pós pico do concreto e a propagação de fissuras através do cálculo da energia de fraturamento. Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho da energia de fraturamento do concreto com formação de etringita tardia. Para isso, foram produzidos em laboratório concretos com resistências à compressão de 30 e 60 MPa. Com o intuito de induzir a formação de etringita tardia, os concretos foram expostos a um tratamento térmico com temperaturas máximas de 65 e 85 °C durante sua cura e armazenados a 38 °C e 96% de umidade. A variação longitudinal das amostras foi acompanhada semanalmente. O material foi analisado quanto a sua resistência à compressão, à tração por compressão diametral, ao módulo de elasticidade estático e dinâmico, *Stiffness Damage Test* (SDT) e energia de fraturamento aos 28 dias (sem tratamento térmico) e ao serem alcançados os níveis de expansão de 0,05, 0,12 e 0,30%. Os resultados demonstraram a influência do consumo de cimento e temperatura máxima de cura, em que o concreto de 60 MPa curado a 85 °C expandiu primeiro, seguido pelo concreto de 30 MPa curado a 85 °C e por último o concreto de 60 MPa curado a 65 °C. No último nível de expansão houve um crescimento da resistência à compressão do concreto de 60 MPa de até 18% e uma queda de 14% no concreto de 30 MPa em relação aos 28 dias. A resistência a tração e o módulo de elasticidade mantiveram valores similares e o SDT não apresentou resultados conclusivos. A energia de fraturamento teve maior queda nos concretos tratados a 85 °C em comparação ao tratamento de 65 °C e também no concreto de 30 MPa, devido ao menor consumo de cimento, em comparação ao concreto de 60 MPa.

Palavras-chave: Ataque interno por sulfato. Formação de etringita tardia. Energia de fraturamento. Durabilidade. Expansão. Cura térmica.

LEITE, L. S. **Study of fracture energy in concrete with expansive reaction.** 117 p. Dissertation (MSc). Master Scientiae in Civil Engineering, Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

The durability and service life of concrete structures are of technical, economic, environmental and safety importance. Among the several types of pathological manifestations that can occur in a structure, there is delayed ettringite formation, a type of sulfate attack, which occurs when concrete during hydration process reaches temperatures greater than 65 °C. This reaction is expansive and causes cracking in the affected element. Considering that cracks can compromise structural integrity and be a gateway to other deleterious mechanisms, it is extremely important to understand the performance of concrete in this situation. For that matter, Fracture Mechanics researches concrete post-peak behavior and the propagation of cracks by calculating the fracturing energy. This work aimed to evaluate the fracturing energy performance of concrete with late ettringite formation. To do so, concretes with compressive strengths of 30 and 60 MPa were produced in the laboratory. In order to induce delayed ettringite formation, the concretes were exposed to a heat treatment with maximum temperatures of 65 and 85 °C during curing and stored at 38 °C and 96% humidity. The longitudinal variation of the samples was monitored weekly. The material was analyzed for its compressive strength, tensile splitting strength, static and dynamic modulus of elasticity, Stiffness Damage Test (SDT) and fracture energy at 28 days (without heat treatment) and at expansion levels of 0.05, 0.12 and 0.30%. The results demonstrated the influence of cement consumption and maximum curing temperature, in which the 60 MPa concrete cured at 85 °C expanded first, followed by the 30 MPa concrete cured at 85 °C and finally the 60 MPa concrete cured at 65°C. In the last level of expansion there was an increase in the compressive strength of the 60 MPa concrete of up to 18% and a 14% drop in the 30 MPa concrete in relation to 28 days. The tensile strength and elastic modulus maintained similar values and the SDT did not present conclusive results. Fracture energy had a greater drop in concrete treated at 85 °C compared to the 65 °C treatment and also in 30 MPa concrete, due to lower cement consumption, compared to 60 MPa concrete.

Keywords: Internal sulfate attack. Delayed ettringite formation. Fracture energy. Durability. Swelling. Thermal curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento do calor de hidratação das fases do cimento Portland.....	19
Figura 2 - Representação esquemática da liberação de calor durante a hidratação do cimento	21
Figura 3 - Sintomas da ocorrência de ASI.....	27
Figura 4 - Barragem com fissuração mapeada	29
Figura 5 - Dimensões de amostra para simulação da zona de transição.....	31
Figura 6 - Gráfico tensão versus deformação	35
Figura 7 - Modos de propagação	38
Figura 8 - Ensaio de flexão em três pontos	39
Figura 9 - Caminho de ruptura: a) interfacial; b) pelo agregado	40
Figura 10 - Curvas carga <i>versus</i> CMOD para amostras imersas em (a) água, (b) 5% de Na ₂ SO ₄ , (c) 5% de MgSO ₄	43
Figura 11 - Planejamento experimental.....	44
Figura 12 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	47
Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	48
Figura 14 - Diagrama de dosagem.....	50
Figura 15 - Tratamento térmico.....	51
Figura 16 - Medição de expansão com micrômetro	53
Figura 17 - Instrumentação do corpo de prova para ensaio de SDT	55
Figura 18 -Vista da seção transversal do corpo de prova na região do entalhe (dimensões em centímetros).....	56
Figura 19 - Chapas metálicas coladas no corpo de prova.....	56
Figura 20 - a) Preparação do equipamento; b) Posicionamento do corpo de prova.....	57
Figura 21 - Fluxograma para análise estatística	60
Figura 22 - Variação a) longitudinal; b) de massa das amostras	61
Figura 23 - Resistência à compressão do concreto, em MPa.	64
Figura 24 - Gráfico de estimativa de resistência à compressão.....	65
Figura 25 - Resistência à tração do concreto, em MPa	66
Figura 26 - Módulo de elasticidade estático do concreto, em GPa	67
Figura 27 - Módulo de elasticidade dinâmico do concreto, em GPa.....	69
Figura 28 - Gráficos tensão-deformação do grupo C30-85.....	70

Figura 29 - Gráficos tensão-deformação do grupo C60-65	70
Figura 30 - Gráficos tensão-deformação do grupo C60-85	71
Figura 31 - Gráfico tensão-deformação do SDT	72
Figura 32 - Stiffness Damage Index	72
Figura 33 - Plastic Deformation Index	73
Figura 34 - Gráfico SDI versus expansão.....	74
Figura 35 - Gráfico PDI versus expansão.....	75
Figura 36 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C30-85	76
Figura 37 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C60-65	76
Figura 38 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C60-85	77
Figura 39 - Energia de fraturamento do concreto, em N/m.....	78
Figura 40 - Ruptura na zona de transição agregado/pasta, concreto C30-85.	79
Figura 41 - Ruptura através do agregado, concreto C60-85.....	79
Figura 42 - Imagens de MEV do grupo C30-85	80
Figura 43 - Imagens de MEV do grupo C60-65	81
Figura 44 - Imagens de MEV do grupo C60-85	82
Figura 45 - MEV/EDS mapa e ponto C30-85 0,05% de expansão	83
Figura 46 - MEV/EDS ponto C60-65 0,3% de expansão.....	85
Figura 47 - MEV/EDS ponto C60-85 0,12% de expansão.....	87
Figura 48 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C30-85	89
Figura 49 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C60-65	90
Figura 50 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C60-85	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do concreto.....	28
Tabela 2 - Quantitativo de corpos de prova para os ensaios.	45
Tabela 3 - Composição química do cimento CP V ARI utilizado.....	46
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos.....	47
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.....	48
Tabela 6 - Constantes do diagrama de dosagem.....	49
Tabela 7 - Traço de concreto.	50
Tabela 8 - Resistência à compressão aos 7 dias, em MPa.	63
Tabela 9 - Resistência à compressão do concreto, em MPa.	63
Tabela 10 - Resistência à tração do concreto, em MPa.	66
Tabela 11 - Módulo de elasticidade estático do concreto, em GPa.	67
Tabela 12 - Módulo de elasticidade dinâmico do concreto, em GPa.	68
Tabela 13 - Stiffness Damage Index.....	72
Tabela 14 - Plastic Deformation Index.....	72
Tabela 15 - Índices obtidos com o Stiffness Damage Test.	73
Tabela 16 - Energia de fraturamento do concreto, em N/m.	78
Tabela 17 - Compostos identificados.	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Afm	monossulfato
Aft	etringita
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
2CaO.SiO ₂ ou C ₂ S	silicato bicálcico
3CaO. Al ₂ O ₃ ou C ₃ A	aluminato tricálcico
3CaO.SiO ₂ ou C ₃ S	silicato tricálcico
4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃ ou C ₄ AF	ferro aluminato tetracálcico
Ca(OH) ₂ ou CH	hidróxido de cálcio ou portlandita
CaO	óxido de cálcio
CaSO ₄ .2H ₂ O	gipsita
CP B	cimento Portland branco
CP I	cimento Portland comum
CP II	cimento Portland composto
CP III	cimento Portland de alto-forno
CP IV	cimento Portland pozolânico
CP V	cimento Portland de alta resistência inicial
CSH	silicato de cálcio hidratado
Fe ₂ O ₃	óxido de férrico
K ₂ O	óxido de potássio
MgO	óxido de magnésio
MPa	megapascal
Na ₂ O	óxido de sódio
Na ₂ O _{eq}	álcalis equivalentes (Na ₂ O _{eq} = Na ₂ O + 0,658*K ₂ O)
SiO ₂	dióxido de silício
SO ₃	óxido sulfúrico
TiO ₂	dióxido de titânio
ρ _s	densidade seca
ρ _{sss}	densidade saturada com superfície seca

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ARI	alta resistência inicial
ASE	ataque por sulfato externo
ASI	ataque por sulfato interno
ASTM	American Society for Testing and Materials
BC	baixo calor de hidratação
CMOD	<i>crack mouth opening displacement</i>
CTOD	<i>crack tip opening displacement</i>
DEF	<i>delayed ettringite formation</i>
DRI	<i>Damage Rating Index</i>
DRX	difração de raios X
EDS	espectroscopia por energia dispersiva de raios X
FECIV/UFU	Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia
G1	energia de fraturamento pelo modo 1 de abertura
ICSD	<i>Inorganic Crystal Structure Database</i>
LVDT	<i>linear variable differential transformers</i>
MIP	<i>Mercury Intrusion Porosimetry</i>
MEV	microscopia eletrônica de varredura
NBR	norma técnica brasileira
PDI	<i>plastic deformation index</i>
pH	potencial hidrogeniônico
RAA	reação álcali-agregado
RS	resistente a sulfatos
SDI	<i>stiffness damage index</i>
SDT	<i>stiffness damage test</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ZPF	zona de processo de fratura
ZT	zona de transição agregado/pasta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	16
1.2	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	16
2	MECANISMOS EXPANSIVOS NO CONCRETO	18
2.1	CIMENTO PORTLAND	18
2.1.1	<i>Hidratação do cimento.....</i>	20
2.2	REAÇÕES EXPANSIVAS NO CONCRETO	22
2.2.1	<i>Reação álcali-agregado</i>	23
2.2.2	<i>Ataque por sulfato interno.....</i>	25
2.2.2.1	Agregados contaminados com sulfato.....	25
2.2.2.2	Formação de etringita tardia.....	27
2.3	FATORES INTERVENIENTES À OCORRÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA.....	28
2.4	PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO EM MATERIAIS COM DEF	33
2.4.1	<i>Stiffness Damage Test</i>	34
3	MECÂNICA DA FRATURA	37
3.1	FATORES INTERVENIENTES À ENERGIA DE FRATURAMENTO.....	40
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	44
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	45
4.1.1	<i>Aglomerante</i>	45
4.1.2	<i>Agregado miúdo</i>	46
4.1.3	<i>Agregado graúdo.....</i>	47
4.1.4	<i>Água</i>	48
4.1.5	<i>Aditivo hiper plastificante</i>	48
4.2	DEFINIÇÃO DO TRAÇO	49
4.3	PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM, TIPO DE CURA E AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO.....	50
4.4	MONITORAMENTO DA EXPANSÃO	52
4.5	ENSAIOS MECÂNICOS	53
4.5.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	53
4.5.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	54

4.5.3	<i>Módulo de elasticidade estático e dinâmico</i>	54
4.5.4	<i>Stiffness Damage Test</i>	54
4.5.5	<i>Energia de fraturamento</i>	55
4.6	ANÁLISES MICROESTRUTURAIS	58
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA	61
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	62
5.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	65
5.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO.....	66
5.5	STIFFNESS DAMAGE TEST	69
5.6	ENERGIA DE FRATURAMENTO	75
5.7	ANÁLISES MICROESTRUTURAIS	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	APÊNDICE A – VALORES INDIVIDUAIS, MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	105
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE EXPANSÃO LONGITUDINAL E DE MASSA.....	111
	APÊNDICE C – ANÁLISE VISUAL DAS AMOSTRAS.....	113

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o principal componente utilizado em construções, sendo um elemento heterogêneo composto por cimento, água e agregados, podendo ser incluídas adições minerais e aditivos químicos. No cenário mundial, o concreto corresponde ao segundo material mais utilizado do mundo, com taxa de consumo de aproximadamente 25 bilhões de toneladas por ano (AMRAN et al., 2020). Sua alta utilização deve-se principalmente ao custo baixo de produção, à plasticidade no estado fresco, que permite a execução de elementos em diversos formatos, à disponibilidade de matéria-prima em diferentes regiões e a sua durabilidade quando comparada a outros materiais.

O processo de fabricação de estruturas de concreto é uma preocupação no meio técnico-científico, tendo em vista o surgimento cada vez mais intenso de manifestações patológicas, responsáveis pela deterioração e diminuição da vida útil da estrutura (SILVA et al., 2022). Dentre os mecanismos deletérios, destacam-se reações como ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado. Eles podem ser causados por agentes agressivos disponibilizados internamente, ou seja, decorrentes da presença de compostos reativos no cimento, água e agregados, ou externamente, como a presença de sulfatos no ambiente em que o material está exposto (CUSTÓDIO; RIBEIRO, 2019).

Um dos tipos de reações expansivas devido ao ataque por sulfatos é a formação de etringita tardia, conhecida pela sigla DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Esta reação é causada pela decomposição da etringita primária durante a idade inicial do concreto quando a temperatura da pasta ultrapassa 65 °C no decorrer da fase de hidratação. Quando o concreto equilibra sua temperatura com o ambiente, após o endurecimento, a etringita se desenvolve novamente, porém, não há mais espaço nem plasticidade para acomodar os cristais. Por consequência, o concreto sofre tensões internas e expande, formando fissuras e reduzindo as propriedades mecânicas do material (PICHELIN et al., 2020; METHA; MONTEIRO, 2014).

Essa reação causa preocupação quanto à deformação inesperada ou diminuição da integridade das estruturas. Pois, assim como ocorre na reação álcali-sílica (RAS), a formação de etringita tardia é conhecida como uma reação expansiva interna do concreto, que causa padrões de expansão e fissuração severos (KAWABATA et al., 2021). Esta formação de fissuras contribui para diversos casos problemáticos em estruturas de concreto armado, sendo encontrados,

inclusive, ataques ocasionados por esses mecanismos expansivos logo após a finalização da construção (LU et al., 2022).

Desse modo, é importante entender que o comportamento de uma fissura no concreto quanto ao seu crescimento deve-se principalmente à capacidade dos materiais cimentícios em dissipar energia antes e depois de um carregamento máximo, fazendo com que o acréscimo na solicitação do elemento estrutural aumente o crescimento de uma fissura, enquanto que na ausência de acréscimo de carga, a fissura se mantém constante. Esse comportamento é chamado de ruptura quase frágil (KHALILPOUR; BANIASAD; DEHESTANI, 2019).

A fissuração em estruturas de concreto pode provocar concentração de tensões, acarretando a ruína do elemento em níveis de solicitação menores que o projetado. Nesse sentido, a mecânica da fratura permite a quantificação das relações entre as propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de fissuras e os mecanismos de propagação das mesmas (ALHASSAN et al., 2022; FERREIRA, 2019). Por esse motivo, percebe-se a importância do estudo do comportamento de fissuras quando o material se encontra sob a influência de reações expansivas como a DEF, através de ensaio de energia de fraturamento em seus modos de abertura.

Uma outra maneira de se avaliar o comportamento de um material quanto ao seu nível de dano é por meio do *Stiffness Damage Test* (SDT). Com este ensaio, pode-se encontrar uma correlação entre a expansão gerada por mecanismos expansivos e a deformação plástica que se apresenta após a realização de ciclos de carregamento e descarregamento nas amostras. Essa relação é caracterizada a partir de dois índices calculados: o *Plastic Deformation Index* (PDI) e o *Stiffness Damage Index* (SDI) (ZAHEDI et al., 2022a). Para Giannini et al. (2018), a utilização desse teste pode fornecer mais informações do que os ensaios mecânicos convencionais usados para avaliar o concreto afetado por reações expansivas. Tais resultados podem ser observados em diversos trabalhos, como os de Trottier et al. (2022), Zahedi et al. (2022), Schovanz et al. (2021) e Giannini et al. (2018).

Embora esses mecanismos tenham sido mais bem compreendidos nas últimas décadas, entender sua influência na estabilidade global e na vida útil remanescente de estruturas afetadas por eles tem sido um desafio (MOHR; ISLAM; FRANCE-MENSAH, 2023; LUO et al., 2022; NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018). Desta forma, pode-se perceber que existe a necessidade de avaliar

o comportamento estrutural de elementos afetados por mecanismos expansivos de origem interna.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Até o presente momento, a energia de fraturamento do concreto com reação expansiva somente foi avaliada na situação de ataque por sulfato externo isolado ou combinado com ciclos de secagem/molhagem ou gelo/degelo nos trabalhos de Yin et al. (2022), Hu e Yin (2022), Guo, Wang e Qi, (2021) e Yao, Yang e Chen (2020). Além disso, os trabalhos que avaliaram a formação de etringita tardia no concreto utilizaram traços com resistência à compressão da ordem de 30 e 40 MPa (HASPARYK et al., 2022; JOSHI et al., 2022; SCHOVANZ et al., 2021; GIANINNI et al., 2018). Isso indica uma lacuna de pesquisa desta propriedade no concreto afetado por reações expansivas de origem interna, como a formação de etringita tardia e reação álcali-agregado.

Tendo isso em vista, este trabalho teve como objetivo geral estudar o desempenho da energia de fraturamento do concreto com formação de etringita tardia. Foram realizados também outros ensaios como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático e dinâmico e SDT. Estes ensaios foram úteis para monitorar o avanço da formação de etringita tardia, visto que a expansão causada por ela tende a alterar estas propriedades do concreto ao longo do tempo.

Nos objetivos específicos estão incluídos os seguintes itens:

- Induzir, em laboratório, a expansão por formação de etringita tardia;
- Verificar a formação através de análises microestruturais;
- Executar os ensaios em quatro níveis de expansão (0, 0,05, 0,12 e 0,3%), dois níveis de resistência (30 e 60 MPa) e duas temperaturas máximas de cura (65 e 85 °C).

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho contempla cinco capítulos, além da introdução aqui apresentada:

Capítulo 2: Mecanismos expansivos no concreto: constitui uma revisão bibliográfica geral da hidratação do cimento, de alguns tipos de manifestações patológicas expansivas, dos fatores influentes na ocorrência da etringita tardia e procedimentos de avaliação.

Capítulo 3: Mecânica da fratura: apresenta uma revisão dos conceitos fundamentais da mecânica da fratura, tipos de ensaios e fatores intervenientes, com foco no modo I de propagação.

Capítulo 4: Procedimentos experimentais: aborda o planejamento experimental, a caracterização dos materiais utilizados, a definição do traço e moldagem dos corpos de prova, as condições de cura e exposição utilizadas, o monitoramento das expansões e os ensaios mecânicos a serem realizados.

Capítulo 5: Resultados e discussões: apresenta a avaliação dos resultados e sua análise estatística.

Capítulo 6: Considerações finais: evidencia as conclusões principais do estudo realizado e sugere alternativas para pesquisas posteriores.

2 MECANISMOS EXPANSIVOS NO CONCRETO

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento é um ligante hidráulico composto por silicatos e aluminatos de cálcio que, ao misturar-se com a água, adquire propriedades mecânicas. Este material é obtido pela moagem do clínquer e da adição de sulfato de cálcio, escória de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos em diferentes teores de acordo com a classe de cimento a ser produzida (ABNT NBR 16697:2018d).

Na composição química do cimento Portland encontram-se óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), trióxido de alumínio (Al₂O₃), trióxido de ferro (Fe₂O₃), pequenas quantidades de óxido de magnésio (MgO) e óxido sulfúrico (SO₃), além de algumas impurezas e outros óxidos, como o óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O) e óxido de titânio (TiO₂) (ZAJAC et al., 2022; NEVILLE, 2016).

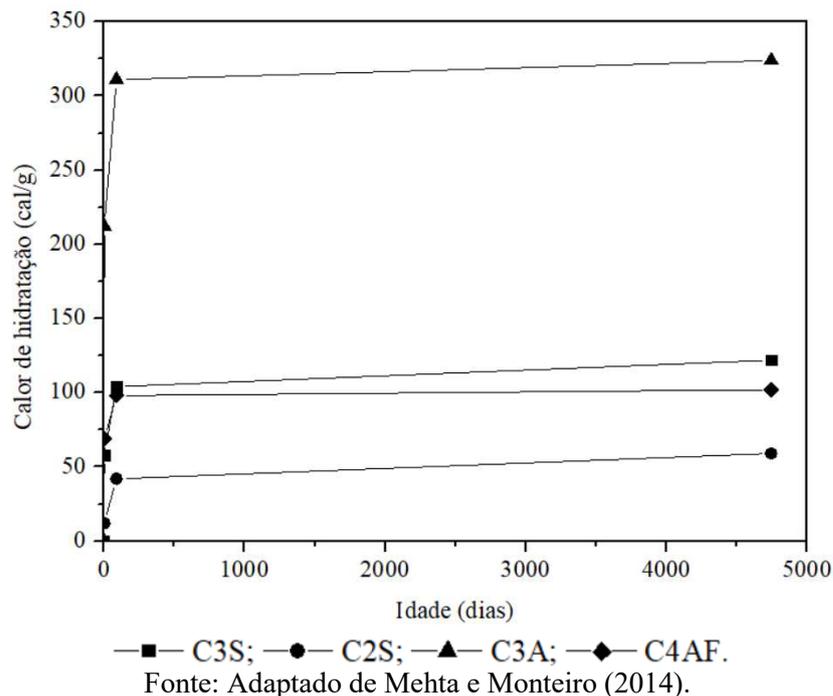
O óxido sulfúrico é normalmente adicionado ao clínquer na forma de gipsita (CaSO₄.2H₂O) com o intuito de regular a pega do cimento e possui uma limitação de teor de 4,5% em massa pela norma brasileira. O óxido de magnésio também possui uma restrição de 6,5% por reagir com a água e formar um produto expansivo. Os óxidos de sódio e potássio, que podem reagir com alguns agregados silicosos ou carbonáticos e formar um produto expansivo expressos por Na₂O_{eq}, são provenientes de argilas e seu teor no cimento varia entre 0,3 e 1,5% (ABNT NBR 16697:2018d).

A moagem, mistura e queima destes materiais produz o cimento, que é constituído por: silicato tricálcico (3CaO.SiO₂ ou C₃S), silicato bicálcico (2CaO.SiO₂ ou C₂S), aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃ ou C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C₄AF) (DORN; BLASK; STEPHAN, 2022; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A proporção dos compostos mencionados no cimento varia conforme o tipo a ser fabricado e afeta diversas propriedades da matriz cimentícia no estado fresco e endurecido. O C₃S ou alita, que compõe cerca de 40 a 70% do cimento, é responsável pela resistência inicial da pasta e contribui para o calor de hidratação. O C₂S ou belita, presente entre 10 e 40% na composição, é menos reativo que a alita, mas contribui para a resistência final da pasta. O C₃A é um material

altamente reativo, de pega instantânea, desenvolvendo um calor de hidratação muito maior que os demais compostos e constitui cerca de 2 a 15% do cimento. O C_4AF , embora seja de baixa reatividade, apresenta uma hidratação parecida com o C_3A e está presente no cimento em teores entre 3 e 15%, sendo ausente em cimentos brancos. Na Figura 1 é apresentada a progressão do calor de hidratação desses compostos no cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 1 - Desenvolvimento do calor de hidratação das fases do cimento Portland



No Brasil, o cimento Portland possui seis categorias padronizadas: CP I, CP II, CP III, CP IV, CP V e CP B. Ainda, esses tipos de cimento contam com subdivisões de acordo com a classe de resistência à compressão, a composição da adição presente, se houver, e se eles são de baixo calor de hidratação (BC) ou resistentes a sulfatos (RS). No Quadro 1 está resumida a classificação dos cimentos Portland brasileiros, extraído da norma ABNT NBR 16697:2018d.

Para que um cimento seja considerado resistente a sulfatos (RS), o teor de C_3A deve ser menor ou igual a 8% e o teor de adições carbonáticas deve ser menor ou igual a 5% em massa. Além disso, ao se realizar o ensaio estabelecido pela ABNT NBR 13583:2014, a expansão do corpo de prova deve ser menor ou igual a 0,03% aos 56 dias de idade (ABNT NBR 16697:2018d).

Na categoria de baixo calor de hidratação (BC), de acordo com o ensaio padronizado pela ABNT NBR 12006:1990, o cimento deve apresentar um calor de hidratação menor ou igual a 270 J/g em 41 h de ensaio (ABNT NBR 16697:2018d).

Quadro 1 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência (MPa)	Sufixo	
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	
	Com adição	CP I-S			
Cimento Portland	Com escória granulada de alto forno	CP II-E			
	Com material carbonático	CP II-F			
	Com material pozolânico	CP II-Z			
Cimento Portland de alto-forno		CP III			
Cimento Portland pozolânico		CP IV			
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40
	Não estrutural	CPB			-

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697:2018d.

2.1.1 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento Portland é dada por reações químicas simultâneas entre o clínquer, o sulfato de cálcio e a água, que conduzem à pega e ao endurecimento. A pega consiste na mudança de estado da matriz cimentícia de uma suspensão concentrada de partículas floculadas para um sólido viscoelástico capaz de suportar tensões aplicadas. O desenvolvimento desse sólido é chamado de endurecimento, um processo físico-químico que conduz ao desenvolvimento de propriedades mecânicas (AÏTCIN; FLATT, 2016; BENSTED; BARNES, 2001).

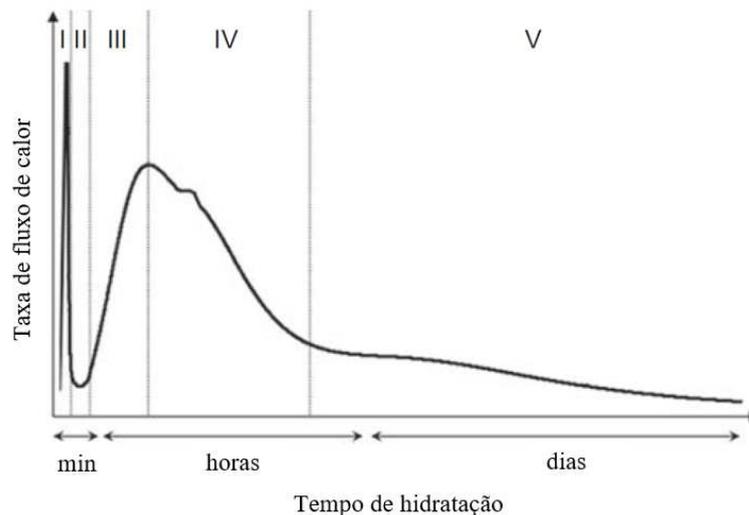
A hidratação do cimento ocorre pela dissolução do grão anidro em água, onde se verifica a formação de um produto interno denso e um produto externo disperso ao redor do grão não-hidratado. O processo é cessado pela falta de reagentes ou de espaço para a deposição dos produtos hidratados (SCRIVENER et al., 2019).

Usualmente, o estudo deste sistema se dá pelo acompanhamento da liberação de calor ao longo do tempo, representado na Figura 2. Para o melhor entendimento das reações, a hidratação pode ser dividida em cinco estágios, de acordo com o comportamento da curva (SCRIVENER et al., 2019; AÏTCIN; FLATT, 2016).

Nos primeiros minutos de hidratação, estágio I, há a rápida formação de hidratos de alumínio e um pico de liberação de calor. Estes produtos formados geralmente são a etringita primária

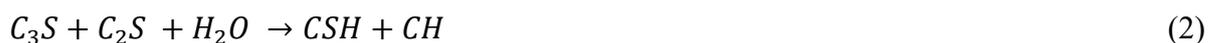
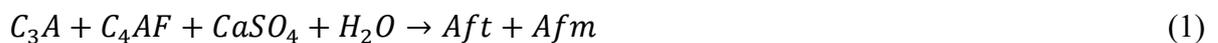
(Aft) e o monosulfoaluminato (Afm), que contém altos teores de sulfato, fornecido por fontes como sulfatos alcalinos, hemi-hidratos e gesso. Também ocorre a rápida dissolução da cal livre presente no clínquer que pode ser consumida pelas fases de aluminato (ANDRADE NETO; DE LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021). Durante o período de indução, estágio II, acontece a nucleação do silicato de cálcio hidratado (CSH) e da portlandita (CH), além da formação de etringita primária e de monosulfato. No período de aceleração, estágio III, há o aumento da formação de CSH e a dissolução da etringita primária e do monosulfato no período de desaceleração, estágio IV (ANDRADE NETO; DE LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021; AÏTCIN; FLATT, 2016).

Figura 2 - Representação esquemática da liberação de calor durante a hidratação do cimento



Fonte: Adaptado de Aïtcin e Flatt (2016).

As reações de hidratação podem ser descritas esquematicamente pelas equações 1 e 2.



Quando acontece o aumento da temperatura do concreto durante a cura, seja pelo calor de hidratação em grandes volumes de material ou pelo tratamento térmico em elementos pré-moldados, a etringita primária e o monosulfato se dissolvem em sulfatos e aluminatos. O sulfato liberado se liga reversivelmente ao CSH. Ao retornar para a temperatura ambiente e na presença

de água, os sulfatos e aluminatos combinam-se, produzindo a etringita tardia (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022; SELLIER; MULTON, 2018).

2.2 REAÇÕES EXPANSIVAS NO CONCRETO

Do ponto de vista da elaboração de projetos de estruturas em concreto, muitas das vezes as propriedades mecânicas do material se sobressaem em relação às características relacionadas à durabilidade no ambiente que a estrutura está inserida. Uma estrutura de concreto corretamente dimensionada e produzida (escolha de matérias-primas, mistura, lançamento e cura) normalmente apresenta uma durabilidade adequada, embora a deterioração prematura possa ocorrer por outros fatores, como agregados reativos, difusão de íons cloreto, sulfato e carbonatação (WALLY; MAGALHÃES; SILVA FILHO, 2022; HOOTON, 2019; METHA; MONTEIRO, 2014).

As manifestações patológicas podem ser de fontes internas ou externas ao concreto, por ações físicas, mecânicas ou químicas. As ações físicas englobam as implicações entre o contato de materiais com coeficientes de dilatação distintos sob altas temperaturas ou ciclos de gelo/degelo. Impacto, abrasão e erosão estão entre os agentes mecânicos de deterioração. As ações químicas de fontes internas podem ser representadas pela reação álcali-agregado e de fontes externas podem ser citados o ataque por cloretos e carbonatação (METHA; MONTEIRO, 2014).

Em particular, o ataque por sulfatos decorre de ambas as fontes e forma produtos distintos como a taumasita e a etringita. As fontes externas são solo e água contaminados no ambiente no qual o elemento está inserido e as fontes internas são agregados contaminados por gipsita e liberação tardia de sulfatos por decomposição térmica (RIDA; ALAOUI, 2022; DOBROVOLSKI et al., 2021; ELAHI et al., 2021).

Qualquer que seja a situação, a permeabilidade do concreto tem papel fundamental na ocorrência da reação expansiva. Os fatores determinantes neste caso são o sistema de poros do material e a região entre a pasta de cimento e o agregado (LI et al., 2020; SONG et al., 2020). Durante a hidratação, a permeabilidade da pasta de cimento se altera com o avanço das reações de hidratação. No estado fresco, o fluxo de água é determinado pela dimensão, forma e

concentração dos grãos de cimento. Com o desenvolvimento do gel de CSH, a permeabilidade diminui, visto que o CSH ocupa cerca de duas vezes o volume da partícula não hidratada (SONG et al., 2020; METHA; MONTEIRO, 2014).

Quanto à zona de transição agregado/pasta, a distribuição granulométrica do agregado e sua dimensão afetam a formação de microfissuras nessa região. Posteriormente, estas microfissuras podem se propagar e se conectar, contribuindo para o aumento da permeabilidade do concreto (BAJI et al., 2019; METHA; MONTEIRO, 2014).

2.2.1 Reação álcali-agregado

De acordo com a ABNT NBR 15577:2018b, a reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto entre os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, da água de amassamento, de aditivos químicos, de adições pozolânicas, entre outros) e alguns tipos de minerais presentes nos agregados com a presença de água. Este processo pode acontecer de duas formas: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC).

Algumas estruturas são mais passíveis de manifestar RAA por causa de suas situações de exposição, como barragens, pavimentos de concreto e blocos de fundação caso contenham agregados reativos e estejam em contato com umidade (HAYES et al., 2018).

As principais evidências que indicam a ocorrência da RAA no concreto são: fissuras tipo “mapa”, eflorescência e exsudação de gel, descoloração do concreto, agregados graúdos com bordas de reação, poros preenchidos por material esbranquiçado com composição de gel e microfissuração da argamassa com preenchimento de material branco (MOHAMMADI; GHIASVAND; NILI, 2020; HAYES et al., 2018).

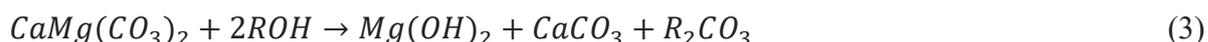
A RAS é mais comum e mais estudada, onde é formado um gel hidrofílico expansivo pela reação entre a sílica instável do agregado (miúdo ou graúdo) e os hidróxidos alcalinos (K^+ , Na^+ , OH^-) presentes na pasta de cimento. A tensão de tração produzida nos poros e a viscosidade do gel levará à fissuração e infiltração do material pelo concreto, além de causar deslocamentos diferenciais em estruturas de concreto e perda de integridade. A propagação das fissuras pode desencadear outras anomalias devido à difusão de agentes agressivos através delas (CAI;

XUAN; POON, 2019; DESCHENES et al., 2018; GHOLIZADEH-VAYGHAN; RAJABIPOUR, 2017).

De acordo com Mohammadi, Ghiasvand e Nili (2020), a redução das propriedades mecânicas do concreto variam de acordo com diferentes parâmetros, como reatividade e granulometria dos agregados e características do gel gerado na reação. Para eles, o módulo de elasticidade e a resistência à tração são mais negativamente afetados do que a resistência à compressão.

Lu et al. (2022) revisaram a deterioração das propriedades mecânicas do concreto e a fratura de barras de aço causadas pela RAS. Os autores concluíram que a resistência à compressão pode diminuir até 60% do valor inicial e o módulo de elasticidade do concreto até 30% do valor inicial, em 0,6% de expansão. Quanto aos estribos de aço, a área de dobra cria uma região de microfissuração que fica sob tensão e, ao passar pela RAS, as fissuras podem crescer até a ruptura.

A RAC é menos comum, causada pelo uso de rochas carbonáticas no concreto que passam por um processo de “desdolomitização” (equações 3 e 4) e tem potencial para ser uma reação cíclica. Nas Equações 3 e 4, R representa o cátion alcalino disponível (Na^+ , K^+ , Li^+) (LI et al., 2022; MILANESI; MARFIL; LOCATI, 2020).



Os álcalis (R) reagem com a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) para formar brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e um álcali-carbonato solúvel. Este álcali continua a reagir com a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da pasta de cimento até consumir a dolomita disponível (LI et al., 2022; MILANESI; MARFIL; LOCATI, 2020).

Milanesi et al., (2020) estudaram a reatividade de uma rocha dolomítica encontrada na Argentina através da expansão de um prisma rochoso e a formação dos produtos da reação de desdolomitização. No primeiro ensaio, o prisma foi exposto a soluções de NaOH, KOH, LiOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e foi observada a formação de diferentes produtos em velocidades distintas. No segundo ensaio, a rocha foi aplicada como agregado graúdo no concreto e o progresso da reação

foi quantificado utilizando-se a técnica de difração de raios-X (DRX).

Ainda, comprovaram que o mecanismo deletério é do tipo álcali-carbonato, embora os modelos de previsão da literatura não se mostraram satisfatórios para descrever o comportamento da reação. Notaram também que quanto menor o número atômico do cátion alcalino disponível, mais rápido é o início da reação, demonstrando a característica difusiva do processo e a importância da porosidade do agregado.

Tendo em vista o trabalho anterior, Milanesi, Marfil e Locati (2020) propuseram um novo modelo baseado na teoria osmótica para representar a RAC. Este modelo considera o pH da solução nos poros, o tipo de cátion alcalino presente e o efeito da água, da temperatura, do tamanho do agregado e do material cimentício suplementar (SCM) presentes.

De Grazia et al. (2021), realizaram um extenso programa experimental com tipos distintos de agregados, conhecidos por apresentarem RAS ou RAC, com o intuito de incluir novos parâmetros ao modelo de expansão para RAA desenvolvido por Larive (1997). Também foram utilizados dados da literatura para validação do trabalho. Os autores propuseram os critérios de tipo e reatividade do agregado, teor de álcalis do concreto, temperatura e umidade relativa externas e também coeficientes de acordo com a influência destes fatores na reação. A equação elaborada apresentou precisão adequada ao retratar a cinética da RAA e a expansão final, embora seja adequada apenas para condições de laboratório e não de campo.

2.2.2 *Ataque por sulfato interno*

2.2.2.1 Agregados contaminados com sulfato

Um dos modos de ataque por sulfato interno é aquele no qual as fontes de sulfato são os agregados, miúdo ou graúdo, aplicados na fabricação do concreto. Os compostos presentes em agregados mais propensos a causar a reação são a pirita (FeS_2) e a pirrotita (Fe_{1-x}S) (PAUL et al., 2022; DUCHESNE; RODRIGUES; FOURNIER, 2021).

Consoante a ABNT NBR 7211:2019a, na hipótese dos agregados serem oriundos de áreas litorâneas ou industriais, águas salobras e solos contaminados com gipsita, o teor de sulfato não

pode ser maior que 0,1%, determinado pelo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 9917:2022a.

Na presença de água, a oxidação da pirita e pirrotita produzem sulfato ferroso e ácido sulfúrico. Na sequência, o ácido liga-se com a calcita ou com a portlandita para gerar gipsita, que, posteriormente, origina a etringita secundária ou taumasita, caso reaja com os aluminatos hidratados ou o CSH (PAUL et al., 2022; DUCHESNE; RODRIGUES; FOURNIER, 2021).

Os fatores que governam esse tipo de manifestação patológica são o teor de oxigênio, umidade, temperatura e pH da estrutura, além da superfície específica, morfologia e quantidade de ferro presente no sulfeto. Inicialmente, é indispensável a presença de oxigênio e água para a oxidação ocorrer e causar a redução do pH do concreto, que também pode ser acelerada pelo aumento de temperatura. Quanto maior for a superfície específica do agregado e o teor de ferro presente, maior será a oxidação (MARCELINO et al., 2020; GUIRGUIS; SHEHATA, 2017).

Marcelino et al. (2020) propuseram uma metodologia de avaliação de agregados contendo sulfatos para aplicação em concreto, a partir de uma rocha com 1,5 a 5% de enxofre, com o intuito de determinar qual é a granulometria menos reativa para o uso seguro em concreto. As quantidades de pirita e pirrotita foram definidas pelo ensaio de combustão direta, onde as amostras foram imersas em uma solução de H_2O_2 (peróxido de oxigênio) a fim de quantificar o teor de sulfato liberado. Os autores concluíram que quanto maior a área exposta e menor a granulometria do material, maior será a oxidação e reatividade do agregado.

Zhong e Wille (2018) investigaram fundações residenciais deterioradas pela ação de agregados com pirrotita a partir da extração de testemunhos destas estruturas. Os indicativos da ocorrência deste tipo de ataque por sulfato interno foram a presença de fissuras mapeadas, depósitos esbranquiçados e grandes aberturas nas fissuras, como demonstrado na Figura 3. Diversas técnicas microestruturais foram aplicadas para identificar e confirmar a presença de pirrotita, etringita e taumasita nas amostras, como FRX, DRX, MEV/EDS e EDX. Estas análises mostraram também a presença de outros produtos da oxidação da pirrotita, por exemplo, ferridrita, goetita e enxofre.

Figura 3 - Sintomas da ocorrência de ASI



Fonte: Zhong e Wille (2018).

Capraro, Macioski e Medeiros (2021) avaliaram o impacto do agregado com pirita na corrosão de armaduras em concreto. A princípio, foram determinadas as propriedades químicas e microestruturais de pastas de cimento contaminadas com teores de SO_3 de 0, 0,5, 1 e 5% por MEV/EDS e DRX com o intuito de identificar os produtos deletérios formados. Já em concretos, foram estudados o potencial de corrosão, resistividade elétrica e densidade de corrente com os mesmos teores de contaminação das pastas. Para o maior teor de contaminação, os autores constataram a alta propensão à corrosão do aço e a ausência da camada passivadora. Os resultados demonstraram uma mudança de comportamento nas amostras com maior concentração de SO_3 , na qual houve uma redução na porosidade nas idades iniciais e depois um considerável aumento. Isso pode ser explicado pelo preenchimento dos poros com os produtos da reação sem causar dano inicialmente e o surgimento de tensões e fissuração apenas depois que não há mais espaço para acomodação.

2.2.2.2 Formação de etringita tardia

Conforme exposto anteriormente, o ataque por sulfatos pode ocorrer devido a origens distintas de sulfato, e uma delas é o próprio cimento. Nesse caso, ocorre a decomposição da etringita primária durante a hidratação do cimento em que a fonte de calor pode ser de uma cura a alta temperatura, como em elementos pré-moldados, e do aumento de temperatura de grandes volumes de concreto pela energia liberada na hidratação, como em barragens. A temperatura necessária para a decomposição é maior ou igual a $70\text{ }^\circ\text{C}$ além da exposição a um ambiente úmido (HASPARYK et al., 2022; JOSHI et al., 2022).

Este mecanismo expansivo inicialmente pode melhorar a resistência à fratura do concreto devido ao preenchimento dos poros antes da expansão ter início. Quando a expansão ocorre, a fissuração causada enfraquece o concreto (YAO; YANG; CHEN, 2020).

Schovanz et al. (2021) avaliaram o efeito da formação da etringita tardia nas características físicas, mecânicas e microestruturais de um concreto por 6 meses. Os resultados mostraram que o DEF pode gerar expansões de até 1% e reduzir as propriedades mecânicas, como resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade em mais de 50%. Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos pelos autores para os ensaios citados em determinadas idades.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do concreto.

Propriedades	Idade (dias)				
	07	28	56	84	168
Resistência à compressão (MPa)	37,91	33,07	29,08	27,44	16,87
Resistência à tração (MPa)	2,74	2,54	1,74	1,73	1,23
Módulo de Elasticidade (GPa)	27,43	21,40	15,95	8,70	7,65

Fonte: Adaptado de Schovanz et al. (2021).

2.3 FATORES INTERVENIENTES À OCORRÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA

Para que ocorra a formação de etringita tardia, é necessário que exista na matriz cimentícia a decomposição térmica e reformação da etringita, além de microfissuras para o depósito de cristais e ambientes úmidos que facilitam a difusão do SO_4^{2-} e outros íons reativos através de poros capilares com umidade (KOTHARI; TAKAHASHI, 2022; MIURA et al., 2022; SANCHEZ et al., 2018).

A fissuração causada pelo depósito de etringita tardia e a queda no pH do meio podem favorecer a ocorrência de outras manifestações patológicas, como a carbonatação, corrosão das armaduras e reação álcali-agregado, gerando ataques combinados (MIURA et al., 2022; CAMPOS et al., 2018).

Campos et al. (2018) avaliaram o ataque conjugado de DEF e RAA em uma barragem de gravidade com deslocamentos irreversíveis (Figura 4). Baseados nos dados de monitoramento coletados ao longo dos anos, os autores propuseram um modelo numérico para estimar a distribuição da expansão no elemento e sua estabilidade estrutural. Foram consideradas as diferenças nas cinéticas das reações e sua formação preferencial na superfície da barragem.

Diversas condições influenciam a ocorrência de ataque interno por sulfato, mas, de forma isolada, não são causadores do processo. Estes fatores podem ser agrupados em características do material, microestrutura do concreto, condições de cura e exposição.

Esta manifestação patológica está relacionada à matriz cimentícia. Por isto, a composição química do cimento afeta a expansão e é o aspecto mais relevante entre os fatores pertinentes aos componentes do concreto ou argamassa. Em cimentos com alto teor de C_3A (maior que 10%) e de SO_3 (maior que 3%) a ocorrência da formação de etringita tardia é favorecida. A solubilidade e decomposição da etringita primária também é favorecida pelo teor de álcalis em altas temperaturas (BOURCHY et al., 2020; LEKLOU; AUBERT; ESCADEILLAS, 2013).

Figura 4 - Barragem com fissuração mapeada



Fonte: Campos et al. (2018).

Os sulfatos são adicionados ao clínquer no intuito de regular a pega, como matéria-prima ou pelo combustível do forno. A proporção entre o sulfato e o alumínio no cimento também interfere nas reações químicas do ataque através da razão SO_3/Al_2O_3 , estando a faixa crítica entre 0,8 e 1,4, com teor péssimo de 1,1 (ZHANG; PAN; ZHANG, 2021). Caso haja grande quantidade de sulfato e nenhum alumínio, ou o inverso, o sulfoaluminato não será formado. Se houver muito SO_3 e pouco Al_2O_3 , em caso de tratamento térmico, a etringita será produzida e caso contrário, será o monossulfato e a etringita tardia (HASPARYK et al., 2022; KAWABATA; TAKAHASHI; WATANABE, 2021; TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Em relação à finura do cimento, quanto maior ela for, maior será a superfície específica, acelerando as reações de hidratação e aumentando o calor liberado. Com isso, cimentos mais

finos possuem maior risco de ocorrência da formação de etringita tardia (BOURCHY et al., 2020).

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) apresenta maior vulnerabilidade ao DEF que outros tipos de cimento, como os com adições pozolânicas e de escória de alto forno (CP II E ou CP II Z). Isso acontece devido ao baixo percentual de adições e à maior finura do CP V ARI em relação aos demais cimentos. As expansões no cimento com filer calcário (CP II F) são lentas, embora não haja alteração no valor final (PORTELLA et al., 2021; TIECHER; LANGOSKI; HASPARYK, 2021).

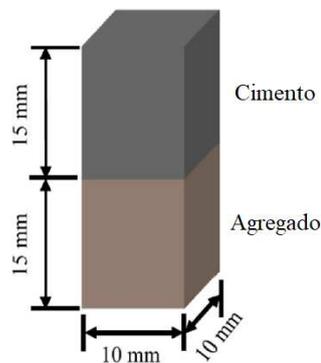
Tiecher, Langoski e Hasparyk (2021) analisaram (durante um ano) o comportamento dos cimentos brasileiros, CP II F, CP II Z, CP IV e CP V ARI, quando induzidos à formação de etringita tardia. Os cimentos foram caracterizados quanto a sua composição química, finura Blaine, perda ao fogo e resíduo insolúvel. O procedimento de cura aplicado nas argamassas foi de 6 h de pré-cura a 25 °C, aquecimento até 85 °C e manutenção nessa temperatura por 12 h e resfriamento e armazenamento a 38 °C.

O material foi avaliado quanto as suas variações longitudinais e de massa, as resistências à compressão e à tração por compressão diametral e também a microestrutura através da MEV/EDS. O cimento CP V ARI foi o que apresentou maior expansão em relação aos demais, chegando à 1,8% em um ano. O CP II F teve expansão baixa (0,06%) até 300 dias de monitoramento e depois teve um crescimento acelerado até a média de 0,45% aos 365 dias. Os cimentos CP II Z e CP IV tiveram expansões reduzidas (menores que 0,10%), embora tenham demonstrado maiores dispersões de valores. Estes resultados podem ser justificados pela presença de cinza volante nos cimentos com menor expansão e conseqüente menor relação SO_3/Al_2O_3 . Além disso, a maior finura, calor de hidratação e relação SO_3/Al_2O_3 dos cimentos com maiores expansões também explicam os valores obtidos (TIECHER; LANGOSKI; HASPARYK, 2021).

O tipo de agregado empregado interfere na qualidade da zona de transição agregado/pasta (ZT) e na forma como ela resiste à expansão, dependendo de sua granulometria e mineralogia, sendo que concretos com agregados silicosos apresentam maiores expansões do que agregados carbonáticos (JEBLI et al., 2021; MIURA; NAKAMURA; YAMAMOTO, 2020; PICHELIN et al., 2020).

Jebli et al. (2021) caracterizaram a expansão causada por DEF na interface entre a pasta de cimento e o agregado. Para isso, foram utilizados corpos de prova prismáticos de dimensões reduzidas para simular a ZT (Figura 5) e corpos de prova cilíndricos com 11 cm de diâmetro e 22 cm de altura. Os resultados do estudo indicaram que a expansão na zona de transição é maior que na pasta de cimento. A avaliação das amostras por MEV mostrou que a cristalização não é homogênea na ZT e que isso afeta diretamente na resistência à tração, como demonstraram os ensaios de tração direta realizados nas amostras prismáticas.

Figura 5 - Dimensões de amostra para simulação da zona de transição



Fonte: Adaptado de Jebli et al. (2021).

O tamanho dos vazios e a forma de ligação entre eles na matriz cimentícia determinam as tensões que podem ser geradas pela expansão dos cristais de etringita. Poros pequenos e pouco conectados podem causar maiores expansões, já que, do contrário, haverá uma melhor acomodação dos cristais. Outro fator influente nesse sentido é a qualidade da zona de transição agregado/pasta e a pré-existência de fissuras (GU *et al.*, 2019, 2020).

Gu et al. (2019) examinaram a distribuição de tamanho de poros em pastas de cimento expostas ao ASE e ao DEF através da *Mercury Intrusion Porosimetry* (MIP). A maior expansão obtida foi no ataque conjugado dos mecanismos, embora, ao fim do monitoramento, a expansão causada somente pelo DEF ainda não estivesse estável. Os resultados indicaram a formação de etringita inicialmente nos poros de gel (menores que 10 nm) e capilares (entre 10 nm e 10 µm) e, posteriormente, nas microfissuras. Isso se deve à dissolução da portlandita e descalcificação do CSH.

Outro fator importante é a condição de cura do concreto, já que esta pode alterar os tipos de hidratos formados em uma mesma pasta. Os principais critérios são: temperatura máxima e taxa de elevação, período pré-cura e aumento da temperatura pelo calor de hidratação.

Usualmente, a temperatura crítica para a geração de expansões é maior que 70 °C, embora, dependendo do consumo de cimento, área específica e teor de álcalis, a expansão pode acontecer a temperaturas de 65 °C (RIDA; ALAOUI, 2022; RAMU et al., 2021; GIANNINI et al., 2018).

Já a taxa de elevação da temperatura de cura pode facilitar a ocorrência de microfissuras devido aos distintos coeficientes térmicos dos materiais da mistura, debilitando a zona de transição agregado/pasta e a matriz cimentícia (NEVILLE, 2016; COLLEPARDI, 2003).

Quanto ao período pré-cura, a resistência do concreto tende a diminuir e ficar mais suscetível a danos por DEF caso ele seja submetido à alta temperatura antes do fim de pega (ERDEM; TURANLI; ERDOGAN, 2003).

Erdem, Turanli e Erdogan (2003) analisaram quatro tempos distintos de pré-cura de acordo com o tempo de início de pega e dois períodos de cura a 80 °C (5 e 10 h) sob a ótica do ganho de resistência à compressão aos 1, 3, 7, 28 e 90 dias em dois tipos de concreto. Os resultados indicaram que há um aumento na resistência à compressão ao atrasar a cura a alta temperatura por um período igual ao tempo de pega do concreto.

Brunetaud et al. (2007) avaliaram o efeito das condições de cura e de dosagem do concreto nas expansões causadas por DEF. Para o primeiro caso, os autores utilizaram duas temperaturas máximas de cura (65 e 85 °C), três teores de álcalis (0,50, 0,75 e 1,00%) e mesmo tipo de agregado (silicoso) e relação água/cimento (0,48). No segundo caso, permaneceram fixos o teor de álcalis (0,75%) e a temperatura máxima de cura (85 °C), variando o tipo de agregado (silicoso e calcário) e a relação água/cimento (0,48 e 0,35). Em ambos os casos, o tempo de cura variou entre duas horas, seis horas, dois dias e dez dias. Foi realizada uma pré-cura por duas horas a 30 °C e a taxa de elevação e declínio de temperatura foi de 25 °C/h. Os autores concluíram que as condições de cura (temperatura e duração) afetam de forma mais significativa as expansões do que a dosagem. Para a temperatura de 65 °C, um aumento na

duração e no teor de álcalis aumentou o risco da ocorrência de DEF. No caso de 85 °C, o risco aumenta entre os tempos de duas horas e dois dias e depois decai.

A temperatura de armazenamento e a umidade relativa do ar afetam a expansão dos elementos de concreto. No caso da estocagem, uma temperatura acima de 27 °C se torna favorável ao mecanismo expansivo, pois age como um catalizador da reação (KCHAKECH et al., 2015).

Uma vez que a água participa das reações de formação dos produtos expansivos e também transporta os íons dessas reações, peças de concreto em ambientes úmidos, acima de 95% de umidade relativa ou em imersão em água, terão as expansões favorecidas (AL SHAMAA et al., 2015). No Quadro 2 são apresentadas as condições de cura utilizadas em alguns trabalhos.

Quadro 2 - Condições de cura e exposição.

Autores	Tipo de material	Dimensões (mm)	Pré cura		Aquecimento/ Resfriamento	Cura		Exposição (imersos)
			T (°C)	t (h)	Taxa (°C/h)	T (°C)	t (h)	
Yammine et al. (2022)	Argamassa/ Concreto	40 x 40 x 160 Φ110 x 220	20	2,0	2,72/ 1,09	80	72	20 °C, água deionizada
Paul et al. (2022)	Argamassa	25 x 25 x 285	23	4,0	20	95	12	23 °C, água com cal
Joshi et al. (2022)	Concreto	Φ100 x 200	20	2,5	17,5	90	15	20 °C, água comum
Hasparyk et al. (2022); Schovanz et al. (2021)	Concreto	Φ100 x 200	25	6,0	10	85	12	38 °C, água comum
Giannini et al. (2018)	Concreto	Φ100 x 200	23	4,0	16,75	90	12	23 °C, água com cal

Fonte: Autora.

2.4 PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO EM MATERIAIS COM DEF

Visto que a formação de etringita tardia causa expansão e fissuração, o que afeta diretamente as propriedades mecânicas da matriz cimentícia, é comum em diversos trabalhos o acompanhamento da reação por medidas de variação longitudinal e de massa, além de ensaios como resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade estático e dinâmico (HASPARYK et al., 2022; JOSHI et al., 2022; RIDA; ALAOUI, 2022; SCHOVANZ et al., 2021).

Também são utilizadas algumas técnicas de análise microestruturais para identificação da manifestação patológica, como microscopia eletrônica de varredura com espectrometria de energia dispersiva (MEV/EDS) e difração de raios X (DRX) (HASPARYK et al., 2022; PORTELLA et al., 2021; SCHOVANZ et al., 2021).

2.4.1 *Stiffness Damage Test*

Além da avaliação das propriedades mecânicas citadas acima, o *Stiffness Damage Test* (SDT) tem se mostrado eficaz para avaliação do dano gerado por diversas manifestações patológicas como RAA, DEF e gelo/degelo. A metodologia atual consiste na aplicação de cinco ciclos de carregamento/descarregamento em corpos de prova cilíndricos, com carga máxima de 40% da resistência à compressão do concreto avaliado.

O SDT inicialmente foi desenvolvido por Walsh (1965) para avaliação de rochas. Mais tarde, Crouch e Wood (1988) e Chrisp, Waldron e Wood (1993) aplicaram o ensaio com cinco ciclos de compressão/descompressão limitados a 5,5 MPa para avaliação do dano em estruturas afetadas pela reação álcali-agregado. Os primeiros autores avaliaram a perda de módulo de elasticidade, o aumento da deformação plástica e dos laços de histerese do gráfico tensão-deformação. Já os segundos autores sugeriram o descarte dos dados do primeiro ciclo de carga, pois acreditava-se que este causava novos danos na amostra.

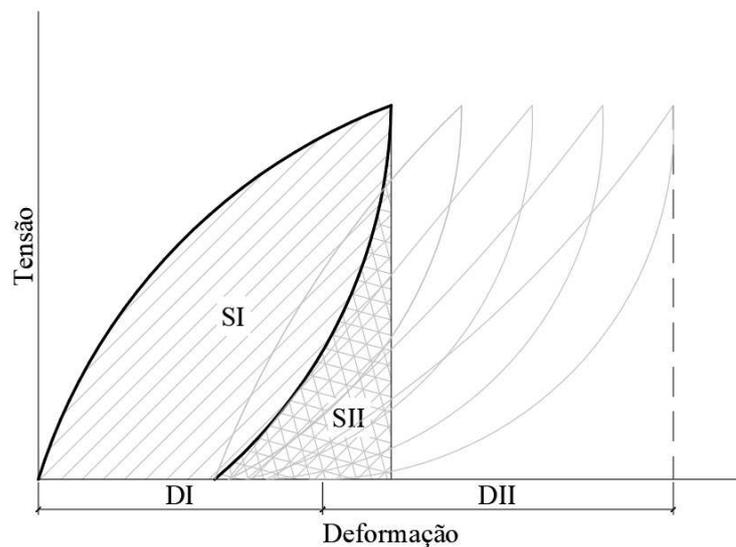
Em suas pesquisas nessa mesma linha, Smaoui et al. (2004, 2005) propuseram elevar a carga máxima dos ciclos a 10 MPa e definiram como os indicadores mais importantes a área de histerese do primeiro loop de carregamento e a deformação plástica acumulada nos cinco ciclos. Os autores inferiram que concretos com diferentes agregados reativos têm distintos resultados no SDT, o que colabora para a identificação da manifestação patológica e nível de expansão em campo.

Sanchez et al. (2015) analisaram o uso do *Stiffness Damage Test* para especificar o dano causado pela reação álcali-agregado em concretos. Os autores avaliaram os parâmetros de entrada (resistência à compressão, tipo de agregado reativo e taxa de carregamento) e saída do teste (área de histerese, deformação plástica, módulo de elasticidade e índice de não-linearidade). Além de confirmar a significância estatística por ANOVA desses critérios, foi sugerido que o ensaio fosse realizado com a taxa de carregamento de 40% da resistência à

compressão ao invés de uma carga fixa, com o intuito de melhorar a distinção dos resultados entre diferentes níveis de expansão e concretos com agregados reativos.

Posteriormente, Sanchez et al. (2016) propuseram dois novos índices calculados a partir do gráfico do ensaio, ilustrado na Figura 6 e através das equações 5 e 6, o *Stiffness Damage Index* (SDI) e o *Plastic Deformation Index* (PDI), visto que estes consideram a energia dissipada no ensaio e fornecem resultados mais confiáveis. Os autores inferiram que utilizar índices absolutos, como a área de histerese e deformação plástica, podem levar a interpretações errôneas, visto que os resultados são fortemente influenciados pelo traço e características mecânicas do concreto afetado pela reação álcali-agregado.

Figura 6 - Gráfico tensão versus deformação



Fonte: Autora.

$$SDI = \sum_{i=1}^5 \frac{SI_i}{(SI_i + SII_i)} \quad (5)$$

$$PDI = \frac{DI}{(DI + DII)} \quad (6)$$

Em que SI corresponde à energia de deformação elástica e SII corresponde à energia de deformação plástica de cada ciclo. DI representa a deformação plástica final e DII a deformação total dos ciclos.

Martin et al. (2017) avaliaram o dano causado pelo ataque conjugado da reação álcali-agregado e formação de etringita tardia em amostras extraídas de uma viga moldada em laboratório. Foram realizados os ensaios de SDT, *Damage Rating Index* (DRI) e expansão residual, que, apesar de serem técnicas com métodos e finalidades distintas, demonstraram adequada correlação de resultados.

Giannini et al. (2018) aplicaram o SDT para caracterizar o concreto afetado por DEF a partir do SDI e PDI. Os autores inferiram que os índices têm uma relação quase linear para expansões menores que 0,4% e que tem relevância estatística a partir de ANOVA. Também foi observado que se o carregamento aplicado é igual ou menor que 40% da resistência à compressão do material, o ensaio se mantém não destrutivo, o que possibilita o uso da mesma amostra para outras análises.

Schovanz et al. (2021) examinaram o desempenho do concreto afetado pelo DEF por meio da resistência à compressão, à tração, do módulo de elasticidade e SDI em vários níveis de expansão. Houveram perdas de mais de 50% das propriedades mecânicas do material e aumento no SDI, o que demonstra severa perda de rigidez.

3 MECÂNICA DA FRATURA

Visto que a presença de defeitos nas estruturas de concreto é inevitável, mesmo sua construção sendo feita de forma padronizada, esta pode evoluir até a ruptura do elemento em determinadas solicitações de carga (XIE et al., 2021).

A Mecânica da Fratura visa o estudo das propriedades dos materiais contendo fissuras ou trincas. Em contrapartida, o estudo da resistência dos materiais através de conceitos como resistência à tração ou à compressão não consideram a tenacidade à fratura, que é a resistência do material à propagação de uma trinca. E é justamente a tenacidade que determina a dimensão crítica de um defeito, a partir do qual pode evoluir para a falha (XIE et al., 2021).

A Mecânica da Fratura se divide em duas abordagens: linear elástica e elastoplástica/ não linear. A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) se aplica nas situações em que a deformação plástica na ponta da trinca é pequena em relação ao volume do material e os resultados de ensaios têm influência do efeito de escala. Já a Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL) foi desenvolvida com o intuito de sanar as limitações da MFLE, considerando o efeito da zona de processo de fratura (ZPF) e de escala (XIE et al., 2021; WANG et al., 2020; CARPINTERI et al., 2017).

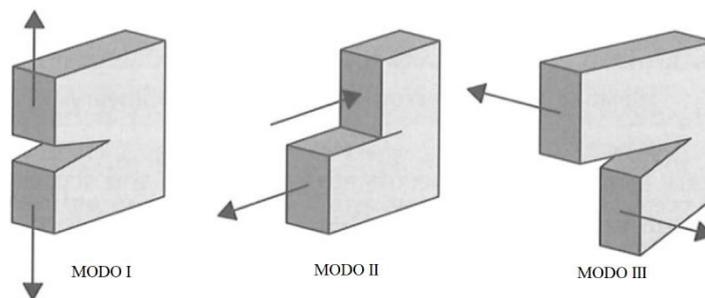
Em relação à energia de fraturamento, é importante salientar que em rupturas frágeis, a deformação plástica antecedente à fratura é baixa ou quase nula, o que implica em uma baixa dissipação de energia. Por outro lado, a fratura dúctil implica em grandes deformações plásticas e, por consequência, alta dissipação de energia. Com isso, energia de fraturamento é a quantidade de energia consumida para propagar uma fissura por unidade de área (FERREIRA, 2019).

A tenacidade de um material é dada pela sua capacidade de dissipar energia até a ruptura. Quanto maior é a área sob a curva tensão *versus* deformação de um material, mais tenaz ele é. O fator de intensidade de tensão (K), que indica a resistência à fissuração, é um critério fundamental para a avaliação da tenacidade à fratura em matrizes cimentícias (BOUALI et al., 2022).

No estudo da Mecânica da Fratura são abordados três modos de sollicitação ao fraturamento na fissura em um corpo sólido, são eles: modos I, II e III, representados na Figura 7.

O modo I, ou modo de abertura, tipo de sollicitação mais encontrado nos trabalhos de Mecânica da Fratura, é definido por uma força nos planos do sólido, normal à face da trinca. O modo II, ou modo de cisalhamento é determinado por uma carga nos planos do sólido, perpendicular à face da trinca. O modo III, ou modo de rasgamento, também é caracterizado por um carregamento nos planos do sólido, perpendicular à face da trinca, mas que causa um deslocamento perpendicular ao plano do sólido (FERREIRA, 2019).

Figura 7 - Modos de propagação

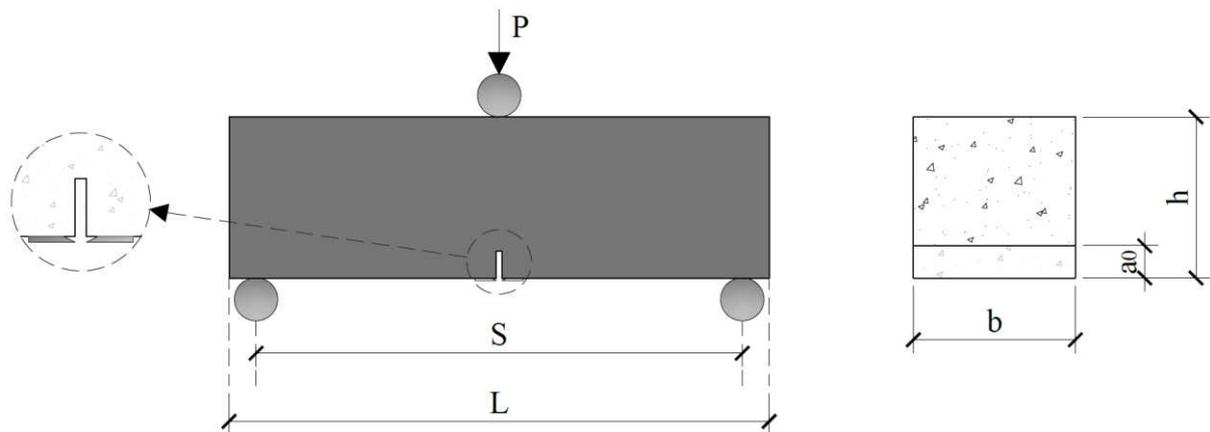


Fonte: Adaptado de Ardalany, Deam e Fragiacomio (2012).

Existem diversas formas de se determinar a energia de fraturamento de um material, seja ele frágil ou dúctil, através de ensaios de flexão em três ou quatro pontos com entalhes centrais ou do tipo *chevron notch* (XIE et al., 2022; JIA et al., 2022; MIARKA et al., 2020).

Uma das configurações de ensaio foi proposta por Hillerborg (1985) e normalizada pela RILEM 50 FMC (1985), no qual é utilizado um corpo de prova prismático com um entalhe central, com a aplicação da carga na forma de flexão em três pontos (Figura 8). A energia de fraturamento neste método é dada pelo trabalho realizado até a ruptura de uma seção transversal com um entalhe e é calculada pela razão entre este trabalho e a área da seção fraturada (XIE et al., 2021). Na Figura 8, P indica a aplicação de carga na amostra, S o vão de ensaio, L o comprimento, b a largura, h a altura e a_0 a altura do entalhe do corpo de prova.

Figura 8 - Ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Autora.

Para examinar a energia de fraturamento levando em consideração o efeito de escala (G_f), tem-se o método estabelecido pela RILEM 89 FMC (1990), também através da flexão em três pontos. O ensaio é realizado em vigas de dimensões distintas, mantendo a mesma proporção e limitando a dimensão máxima do agregado. Para o cálculo do G_f , somente é necessário o valor da carga máxima alcançada no ensaio, não sendo relevante o comportamento pós-pico (XIE et al., 2021).

Tendo em vista o difícil manuseio dos corpos de prova maiores para o ensaio de efeito de escala, Alam, Zhu e Loukili (2020) propuseram uma nova metodologia de ensaio baseada em Bazant e Pfeiffer (1987). Os autores sugeriram um índice denominado *heterogeneity size*, dado pela razão entre a largura do corpo de prova e a dimensão máxima do agregado, no qual as dimensões da amostra são mantidas e reduz-se a dimensão máxima do agregado. Os resultados demonstraram similaridade entre o novo parâmetro e o método tradicional, com a vantagem da conservação das medidas dos espécimes.

Dabbaghi et al. (2021) avaliaram o desempenho do concreto leve quando submetido a temperaturas de 750 °C. Foram feitas comparações com o concreto normal sob a ótica da energia de fraturamento através dos métodos de trabalho de fratura (RILEM 50 FCM) e efeito de escala (RILEM 89 FMC). Além disso, foram determinadas as resistências à compressão e à tração, o módulo de elasticidade, o comprimento característico, a tenacidade à fratura, o comprimento da zona de processo de fratura e o índice de fragilidade. Houve uma queda das propriedades mecânicas e da energia de fraturamento da ordem de 78 e 84,7% no concreto

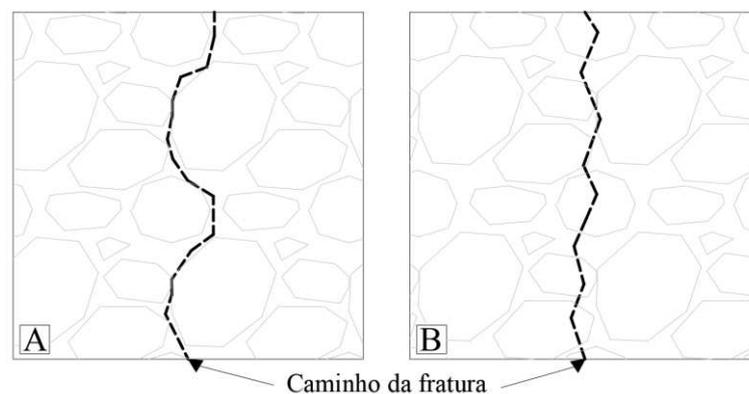
comum e 69 e 77,3% para o concreto leve, respectivamente. Os autores inferiram que a relação entre G_F/G_f foi de 1,82 para o concreto normal e 1,7 para o concreto leve.

3.1 FATORES INTERVENIENTES À ENERGIA DE FRATURAMENTO

Diversos fatores influenciam o desempenho da matriz cimentícia quando submetidos ao fraturamento, como presença de vazios e microfissuras, relação água/cimento, zona de transição entre o agregado e a pasta, tipo de concreto (convencional ou de alta resistência), presença e tipo de fibras e ocorrência de manifestações patológicas, como gelo/ degelo e ataques químicos externos.

A relação água/cimento afeta a zona de transição entre o agregado e a pasta, que, por ser no concreto convencional a região de menor resistência, controla a resposta do concreto às solicitações. Tendo isto em vista, a redução desse fator melhora a ligação entre os materiais ao ponto de, a partir de determinadas resistências, a fratura ocorrer no agregado e não na zona de transição e conseqüentemente, a energia de fraturamento aumentar (Figura 9). O aumento da relação água/cimento tende a diminuir a resistência ao fraturamento devido à maior porosidade, que facilita a microfissuração na zona de transição e menor absorção de energia (WANG et al., 2020; KHALILPOUR; BANIASAD; DEHESTANI, 2019).

Figura 9 - Caminho de ruptura: a) interfacial; b) pelo agregado



Fonte: Autora.

Além disso, a mineralogia, a resistência e o tamanho do agregado também influenciam a energia de fraturamento. A aplicação de agregados maiores no concreto estende o comprimento pelo

qual a fissura precisa contornar, aumentando a energia consumida na fissuração (WANG et al., 2020; VISHALAKSHI; REVATHI; REDDY, 2018).

Vishalakshi, Revathi e Reddy (2018) estudaram a influência na energia de fraturamento de cinco tipos de agregados em concretos de resistência alta e normal. Os materiais foram avaliados quanto à resistência à compressão, à tração por compressão diametral e à flexão, além do módulo de elasticidade. A energia de fraturamento foi determinada pela RILEM 50-FMC.

Os resultados de ensaios no concreto de resistência normal indicaram que não houve diferença significativa de comportamento entre os agregados e que eles não eram o fator limitante de resistência à compressão, embora o módulo de elasticidade tenha apresentado maior distinção. Já para o concreto de alta resistência, notou-se respostas distintas entre os agregados utilizados na resistência à compressão e na energia de fraturamento. De forma geral, o granito cinza obteve melhor desempenho, seguido pela anortosita, charnockita, calcário e gnaiss (VISHALAKSHI; REVATHI; REDDY, 2018).

Wang et al. (2020) realizaram uma avaliação digital da superfície de fratura de concretos produzidos com relações água/cimento, tipos de agregados e temperaturas de cura distintas. Os autores concluíram que a quantidade de agregados inteiros na superfície de ruptura diminuiu com agregados menos resistentes e com a pasta de cimento mais resistente. A cura à alta temperatura acelerou o desenvolvimento da resistência à compressão nas idades iniciais, mas levou a uma menor resistência aos 28 dias, principalmente para relações água-cimento menores e não teve tanta influência na energia de fraturamento quanto ao tipo de agregado. Para o agregado calcário, a energia de fraturamento elevou-se com o aumento da resistência à compressão e o oposto foi observado para o agregado comum.

Outro fator importante no desempenho da matriz cimentícia ao fraturamento é a incorporação de fibras poliméricas ou metálicas que, normalmente, tendem a melhorar o desempenho do material pelo efeito de costura nas fissuras. Para isso, existem fibras de diferentes tamanhos a serem escolhidas de acordo com o propósito de aplicação, sendo também possível a mistura de tipos distintos. Além disso, o teor de fibras adicionadas, a distribuição delas no concreto, a sua resistência à tração e a razão comprimento/diâmetro também afetam o desempenho do sistema (XIE et al., 2021; KHALILPOUR; BANIASAD; DEHESTANI, 2019).

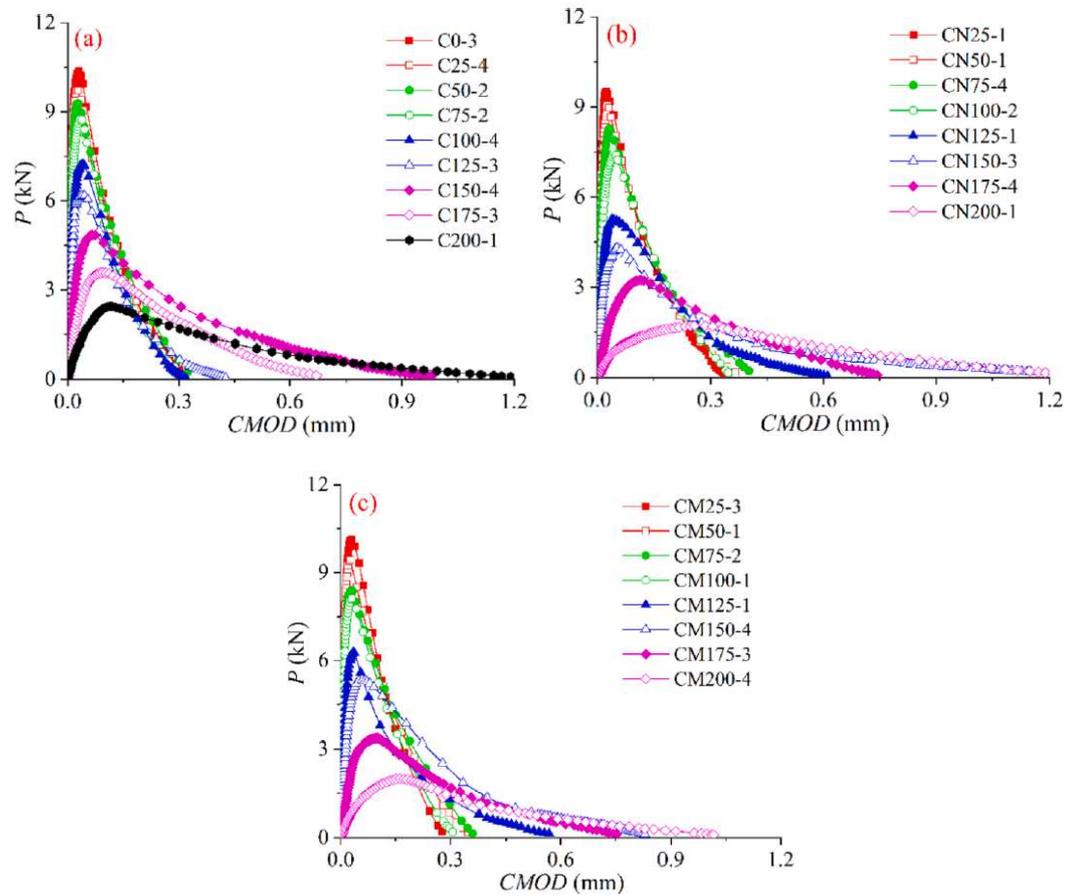
Sangeetha, Sakthieswaran e Babu (2020) avaliaram a tenacidade à fratura de um concreto reforçado com fibra de aço com extremidade em gancho com variações na profundidade do entalhe. O cimento foi substituído por teores distintos de escória granulada de alto forno e o agregado por areia de fundição. Os resultados indicaram uma diminuição da tenacidade à fratura com o aumento na profundidade do entalhe, embora ainda com um desempenho melhor que o concreto sem fibras.

Uma abordagem recente no estudo da Mecânica da Fratura em materiais cimentícios é o comportamento do concreto exposto a ambientes agressivos, por exemplo, ataque de sulfato externo e gelo/degelo.

Yin et al. (2022) estudaram as propriedades de fratura do concreto submetido a ciclos de molhagem e secagem em tipos distintos de soluções contendo sulfato de sódio e de magnésio em concentrações diferentes. O material foi ensaiado em flexão em três pontos e com imagens digitais da propagação da fissura nas idades de 1, 2, 3, 5, 9 e 15 meses com o intuito de monitorar a evolução da zona de processo de fratura (ZPF). Os autores notaram um aumento inicial de tenacidade à fratura no início da corrosão e posterior queda. Com a aplicação da técnica de correlação de imagem digital foi possível acompanhar o desenvolvimento da fissuração e determinar com precisão a evolução da ZPF.

Hu e Yin (2022) exploraram as propriedades de fraturamento de concretos sob ciclos de gelo/degelo e soluções de sulfato de sódio e de magnésio. Além disso, utilizaram o ensaio de flexão em três pontos para a análise dos espécimes. As amostras foram monitoradas quanto às mudanças visuais e perda de massa, além de ensaios à compressão e ao módulo de elasticidade dinâmico. Foi possível observar que, nos primeiros 100 ciclos de gelo/degelo, os corpos de prova submersos em água apresentaram maior dano do que os expostos às soluções de sulfato. Após 200 ciclos de gelo/degelo combinado com a exposição às soluções de sulfato, a deterioração das amostras expostas à solução de sulfato de sódio foi maior (Figura 10). Os ciclos de gelo/degelo provocaram uma queda na carga de pico e aumento do CMOD das amostras.

Figura 10 - Curvas carga *versus* CMOD para amostras imersas em (a) água, (b) 5% de Na₂SO₄, (c) 5% de MgSO₄



Fonte: Hu e Yin (2022).

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados o planejamento experimental, os materiais utilizados e suas caracterizações, o traço definido, a metodologia de moldagem, cura e exposição aplicados.

Foram estabelecidos dois níveis de resistência à compressão, englobando um concreto estrutural e um de alta resistência à compressão. Foram estudados dois níveis de temperatura máxima e três níveis de expansão, além de uma série de corpos de prova sem tratamento térmico, para fins de comparação de comportamento. Na Figura 11 é exposto um resumo do programa experimental proposto.

Figura 11 - Planejamento experimental

Mecanismo de expansão	DEF				
Níveis de resistência	30 MPa		60 MPa		
Níveis de temperatura máxima	65 °C		85 °C		
Níveis de expansão	0%	0,05%	0,12%	0,3%	
Ensaio	Resistência à compressão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de elasticidade	SDT	Energia de Fraturamento

Fonte: Autora.

Para a realização destes ensaios, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e prismáticos, com 15 cm de lado e 50 cm de comprimento.

Na Tabela 2 é apresentada a quantidade de corpos de prova prevista para cada ensaio, totalizando 216 corpos de prova cilíndricos e 84 corpos de prova prismáticos. A codificação dos corpos de prova será “CXX-AA”, sendo o “XX” o valor previsto de resistência à compressão aos 28 dias sem tratamento térmico, e “AA” para o nível de temperatura máxima no tratamento térmico, ou seja, C30-85, C60-85 e C60-65.

Tabela 2 - Quantitativo de corpos de prova para os ensaios.

Traço-temperatura		C30-85				C60-85				C60-65			
Expansão (%)		0,00	0,05	0,12	0,30	0,00	0,05	0,12	0,30	0,00	0,05	0,12	0,30
Cilíndricos (Φ 10 cm x 20 cm)	Resistência à compressão	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Resistência à tração por compressão diametral	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Módulo de elasticidade estático	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Stiffness Damage Test	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Total	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Prismáticos (15 cm x 15 cm x 50 cm)	Energia de Fraturamento	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Total	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Fonte: Autora.

Como parte do monitoramento das expansões, foram realizadas medições de comprimento e de massa semanalmente nos corpos de prova e também ensaios microestruturais para identificar a presença de etringita tardia na medida que os níveis de expansão foram atingidos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa e as caracterizações realizadas.

4.1.1 Aglomerante

Foi utilizado o cimento Portland composto tipo CP V ARI devido a suas características favoráveis à formação de etringita tardia, como maior finura, calor de hidratação e baixo teor de adições, quando comparado a outros tipos de cimento (HASPARYK et al., 2022; PORTELLA et al., 2021; SCHOVANZ et al., 2021).

Foram efetuados os ensaios para a determinação da composição química, massa específica, índice de consistência e de finura, segundo as normas internacionais ASTM C114:2022a, ASTM C188:2017b, ASTM C187:2016b e ASTM C204:2018, em conjunto com as normas equivalentes brasileiras ABNT NBR 14656:2001, ABNT NBR 16605:2017, ABNT NBR 16606:2018c e ABNT NBR 11579:2013, respectivamente. O cimento apresentou massa específica de 3,16 g/cm³, índice de consistência de 37% e índice de finura de 2,66%. Os resultados da composição química obtidos por fluorescência de raios-X são apresentados na Tabela 3. O teor de álcalis equivalente foi de 1,16% e a relação SO₃/Al₂O₃ foi de 0,55.

Tabela 3 - Composição química do cimento CP V ARI utilizado.

Composição química	Resultado (%)	Limite ABNT NBR 16697:2018
CaO	65,16	-
SiO ₂	19,60	-
Al ₂ O ₃	4,62	-
Fe ₂ O ₃	2,71	-
MgO	2,47	≤ 6,5
SO ₃	2,53	≤ 4,5
K ₂ O	0,99	-
Na ₂ O	0,51	-

Fonte: Autora.

4.1.2 Agregado miúdo

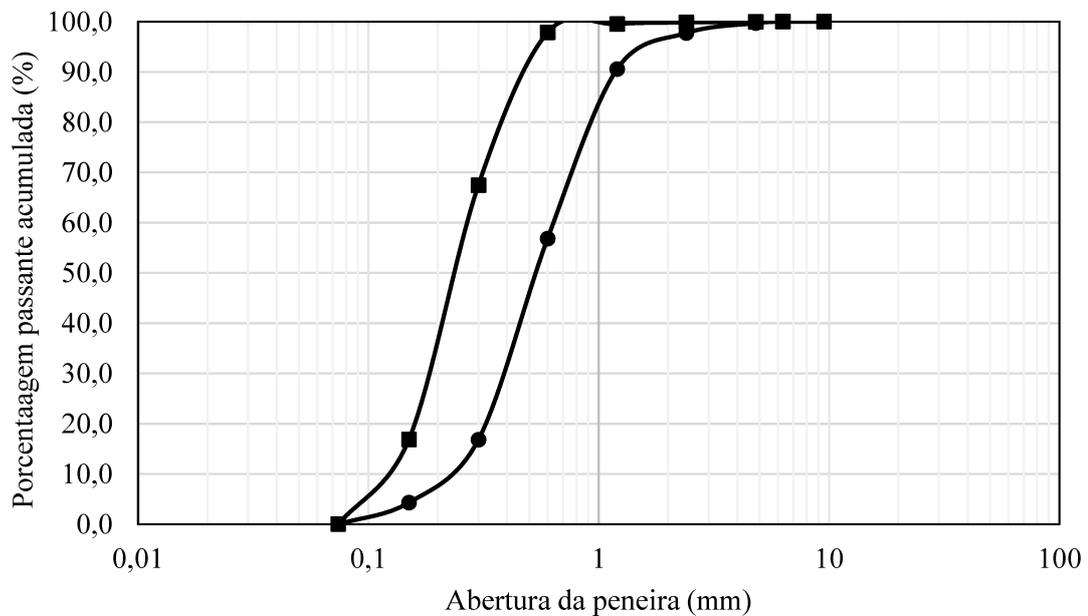
Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, ambos de origem natural, chamados de “areia fina” e “areia média”. Estes foram caracterizados quanto a sua granulometria (ASTM C136/C136M:2019 e ABNT NBR 17054:2022c), densidade seca (ρ_s), densidade saturada com superfície seca (ρ_{ss}) e absorção (ASTM C128:2022b e ABNT NBR 16916:2021a), material pulverulento (ASTM C117:2017a e ABNT NBR 16973:2021d) e massa unitária no estado solto e compactado (ASTM C29/C29M:2016a e ABNT NBR 16972:2021c). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 12.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos.

Ensaio realizado	Areia fina	Areia média	Norma ASTM	Norma ABNT
ρ_s (g/cm ³)	2,63	2,55	C128:2022b	NBR 16916:2021b
ρ_{sss} (g/cm ³)	2,64	2,57		
Absorção (%)	0,46	0,78		
Módulo de finura	1,19	2,34	C136/C136M:2019	NBR 17054:2022c
Dimensão máxima característica	0,60	2,40		
Material pulverulento (%)	3,01	0,53	C117:2017a	NBR 16973:2021e
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,49	1,48	C29/C29M:2016a	NBR 16972:2021d
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,63	1,57		

Fonte: Autora.

Figura 12 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos



—●— Areia média; —■— Areia fina.

Fonte: Autora.

4.1.3 Agregado graúdo

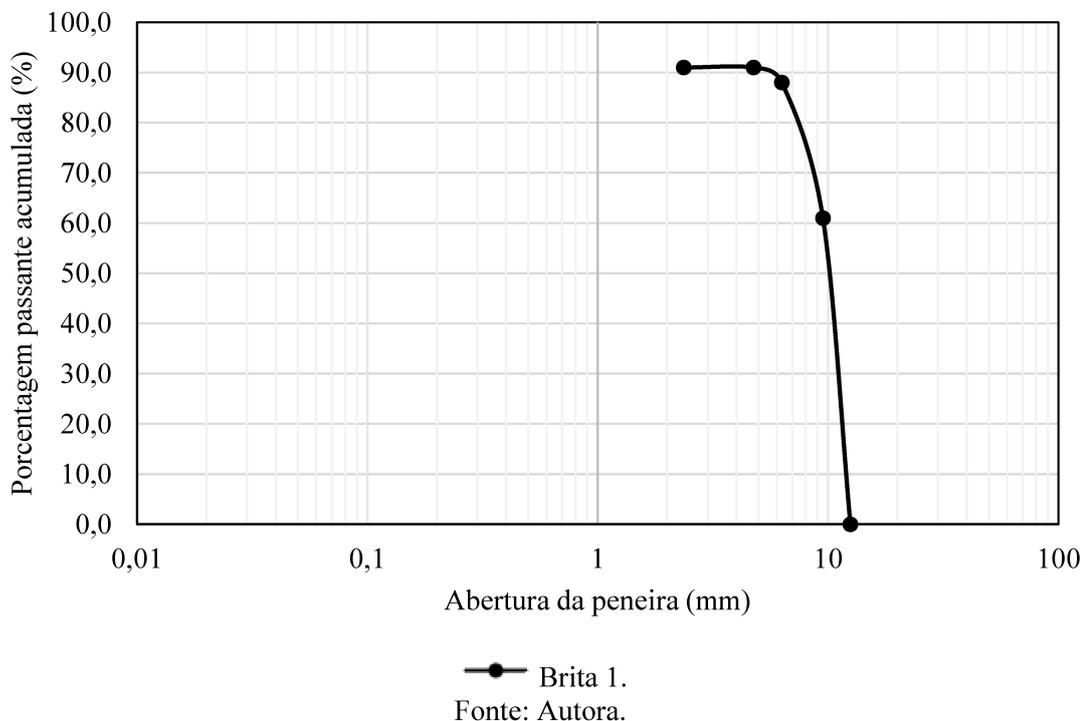
O agregado graúdo, denominado “brita 1”, também de origem natural basáltica, foi caracterizado quanto a sua granulometria (ASTM C136/C136M:2019 e ABNT NBR 17054:2022), densidade seca (ρ_s), densidade saturada com superfície seca (ρ_{sss}) e absorção (ASTM C127:2015 e ABNT NBR 16917:2021b) e massa unitária no estado solto e compactado (ASTM C29/C29M:2016a e ABNT NBR 16972:2021c). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 5 e na Figura 13.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.

Ensaio realizado	Brita 1	Norma ASTM	Norma ABNT
ρ_s (g/cm ³)	2,89		
ρ_{ss} (g/cm ³)	2,91	C127:2015	ABNT NBR 16917:2021c
Absorção (%)	0,01		
Módulo de finura	6,36		
Dimensão máxima característica	19,10	C136/C136M:2019	ABNT NBR 17054:2022c
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,44		
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,55	C29/C29M:2016a	ABNT NBR 16972:2021d

Fonte: Autora.

Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



4.1.4 Água

Para a fabricação do concreto, foi utilizada a água potável fornecida pela rede de abastecimento de água do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) da cidade de Uberlândia, no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da FECIV/UFU.

4.1.5 Aditivo hiper plastificante

No intuito de melhorar a trabalhabilidade do concreto, foi utilizado o aditivo hiper plastificante MasterGlenium 3500 da BASF, de aspecto líquido amarelado, composto por policarboxilatos.

Segundo o fabricante, a densidade está entre 1,10 e 1,14 g/cm³ e o pH está entre 7,0 e 9,0. A dosagem recomendada está entre 0,2 a 1,2% da massa de cimento. O teor aplicado foi de 0,7% da massa de cimento para o abatimento definido.

4.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO

Para a definição do traço, foi utilizado o diagrama de dosagem definido pela Lei de Abrams (1918), Lei de Lyse (1932) e Lei de Prizskulnik e Kirilos (1974), de acordo com as equações 7, 8 e 9, respectivamente. Conforme os resultados da caracterização dos materiais, foram moldados corpos de prova teste para verificação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (7)$$

$$m = k_3 + (k_4 \times a/c) \quad (8)$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 * m} \quad (9)$$

Em que f_{cj} é a resistência à compressão de um concreto a uma determinada idade (j), em MPa, a/c é a relação em massa de água/cimento, em kg/kg, m é a relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg, C é o consumo de cimento em kg/m³ e k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 e k_6 são constantes que dependem do processo de produção do concreto (materiais, consistência, equipamentos).

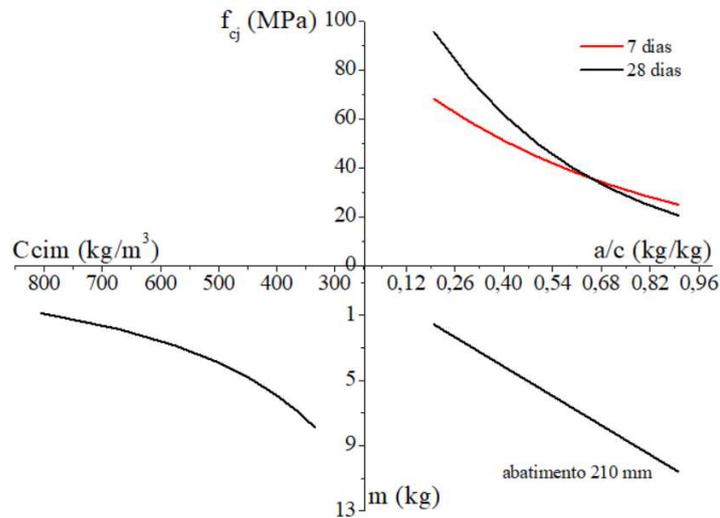
Os resultados para as constantes obtidos pelo método dos mínimos quadrados e pela regra de Cramer aos 7 e aos 28 dias estão apresentados na Tabela 6. Na Figura 14 está plotado o diagrama de dosagem obtido através das equações 7, 8 e 9.

Tabela 6 - Constantes do diagrama de dosagem.

Idade (dias)	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
7	90,64	4,18	-1,00	12,86	0,99	0,25
28	147,97	8,92	-1,00	12,86	0,99	0,25

Fonte: Autora.

Figura 14 - Diagrama de dosagem



Fonte: Autora.

Segundo as equações 7, 8 e 9 e os coeficientes obtidos para 28 dias, determinou-se o traço para 30 e 60 MPa. Consoante a ABNT NBR 12655:2022b, o controle de preparação do concreto será do tipo A, no qual é estabelecido um desvio padrão (S_d) para a resistência à compressão igual a 4,0 MPa. Então, de acordo com a Equação 10 e a Tabela 7, a resistência de dosagem será incrementada.

$$f_{cm28} = f_{ck28} + 1,65 \times S_d \quad (10)$$

Tabela 7 - Traço de concreto.

f_{ck28} (MPa)	f_{cm28} (MPa)	Traço (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
30,00	36,60	1 : 3,27 : 3,94 : 0,64	358,05
60,00	66,60	1 : 1,44 : 2,25 : 0,36	522,61

Fonte: Autora.

4.3 PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM, TIPO DE CURA E AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO

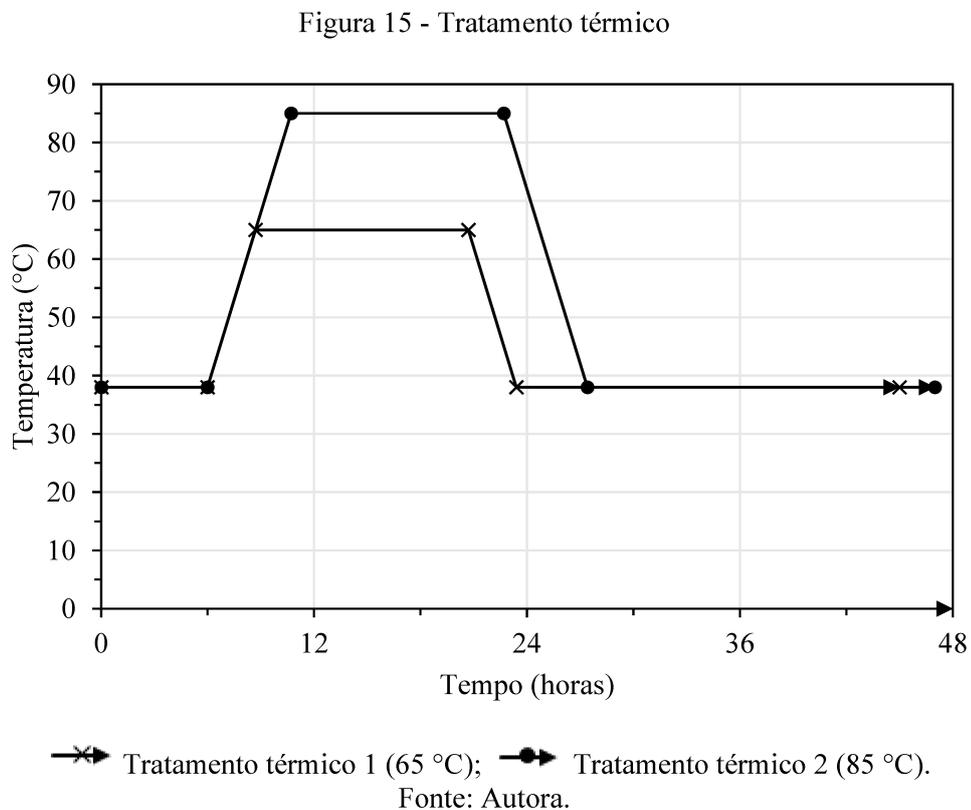
Para a mistura dos materiais, foi utilizada uma betoneira de 400 l e em cada betonada foi produzido 116 l de concreto. Inicialmente foi feito o umedecimento da betoneira e retirado o excesso de água. Em seguida, com a betoneira desligada, foram adicionados a brita, o cimento e metade da água com 0,5% de aditivo. Os materiais foram misturados por aproximadamente um minuto e meio, com pausas para desgrudar o material aderido às pás e paredes da betoneira. Depois foram adicionados a outra metade da água com 0,2% de aditivo e as areias fina e média

e a mistura foi feita por aproximadamente um minuto e meio. Em todas as betonadas foi mantido o abatimento de 210 ± 20 mm verificado pelo ensaio de abatimento de tronco de cone com a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 16889:2020.

Antes da moldagem, foi aplicado desmoldante na superfície interna das formas metálicas. A moldagem dos corpos de prova foi feita em uma camada, com a utilização de um vibrador de imersão. Após a vibração a forma foi completada com concreto, se necessário, e a superfície foi regularizada com uma colher de pedreiro.

Visto que o processo de cura do concreto é fundamental para a formação de etringita tardia, com base no levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 2, optou-se por adaptar a cura térmica sugerida pelo IFFSTAR (2018).

Como o início da dissolução da etringita primária se dá a partir de temperaturas acima de $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, foram aplicadas duas temperaturas máximas durante o tratamento térmico das amostras, $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. O processo adotado está descrito abaixo e resumido na Figura 15.



Após a moldagem, os corpos de prova passaram por um processo de armazenamento em câmara úmida por 6 horas na temperatura de 38 ± 2 °C e umidade relativa de $96 \pm 2\%$. Depois desse período, as amostras foram desmoldadas e transferidas para um tanque fechado aquecido a 38 °C.

A temperatura interna do tanque foi elevada a uma taxa de 10 °C/h até atingir 65 ou 85 °C, utilizando vapor de água. Os espécimes permaneceram nessas condições por 12 horas. Posteriormente, a temperatura foi gradualmente reduzida até atingir 38 °C também a uma taxa de 10 °C/h.

Após a conclusão do tratamento térmico, as amostras foram conservadas a 38 ± 2 °C e umidade relativa de $96 \pm 2\%$, exceto nos dias em que os pinos foram fixados, durante a medição da expansão e nos ensaios, nesses momentos a temperatura ambiente foi mantida.

4.4 MONITORAMENTO DA EXPANSÃO

No intuito de acompanhar a evolução da expansão, foram feitos acompanhamentos semanais do comprimento e massa de seis corpos de prova cilíndricos até ser atingido o último nível de expansão.

Após sete dias da moldagem, as amostras tiveram suas faces retificadas e foram feitos furos centralizados com uma furadeira de bancada para a colagem dos pinos com adesivo epóxi. A medição foi feita em milímetros (precisão de 0,001 mm) com um micrômetro de 30 cm, como demonstrado na Figura 16.

Também semanalmente, no mesmo dia que foi realizado a medição de expansão, os corpos de prova foram pesados em balança com precisão de 0,01 g.

No dia anterior a leitura, os corpos de prova foram retirados da câmara de armazenamento e colocados uma sala climatizada para a estabilização da temperatura. As amostras ficaram armazenadas a 22 °C por aproximadamente 16 horas antes das medições. Foram realizadas dez

medições em cada amostra rotacionando no eixo longitudinal e a variação longitudinal foi dada pela média das leituras.

Figura 16 - Medição de expansão com micrômetro



Fonte: Autora.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Neste item são apresentados os ensaios mecânicos realizados para determinar algumas propriedades mecânicas do concreto conforme a formação de etringita tardia acontece. No caso dos corpos de prova sem tratamento térmico (0% de expansão), os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias. Para os demais, com tratamento térmico, os ensaios foram realizados à medida que foram alcançados os níveis de expansão pretendidos. Todas as amostras cilíndricas tiveram suas faces retificadas antes da realização dos ensaios.

4.5.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi feito de acordo com o método estabelecido pela ABNT NBR 5739:2018a, similar a ASTM C39/C39M:2021, com corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O carregamento deve ser realizado continuamente e sem choques, com velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s e deve ser interrompido quando houver a ruptura da amostra identificada pela queda da carga aplicada. O valor da resistência à compressão foi obtido pela Equação 11.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (11)$$

Onde f_c é a resistência à compressão, em MPa, F é a força máxima alcançada no ensaio, em N, D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para a obtenção da resistência à tração do concreto, foi realizado o ensaio de compressão diametral especificado pela ABNT NBR 7222:2011, semelhante a ASTM C496/C496M:2017c com corpos de prova cilíndricos. A norma estabelece que devem ser posicionados entre o espécime e os pratos da máquina duas tiras de madeira ou aglomerado com o intuito de garantir a aplicação da carga em geratrizes diametralmente opostas. O carregamento deve ser aplicado no corpo de prova continuamente e sem choques na velocidade constante de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura. O valor da resistência à tração por compressão diametral é determinado pela Equação 12.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi D l} \quad (12)$$

Em que $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa, F é a força máxima obtida no ensaio, em N, D é o diâmetro do corpo de prova, em mm, l é o comprimento do corpo de prova, em mm.

4.5.3 Módulo de elasticidade estático e dinâmico

O módulo de elasticidade do concreto foi determinado através de duas metodologias distintas: a primeira, módulo de elasticidade dinâmico, obtido através do ensaio não destrutivo de ultrassom e a segunda, denominada módulo de elasticidade estático, definido pela ABNT NBR 8522:2021a, análogo a ASTM C469/C469M:2022c. Foram utilizados transdutores de 54 e 50 kHz no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

4.5.4 Stiffness Damage Test

Conforme apresentado anteriormente, o SDT foi realizado conforme a metodologia proposta por Sanchez et al. (2015, 2016) que consiste na realização de cinco ciclos de carregamento com

carga máxima de 40% da resistência à compressão do concreto a uma taxa de 0,1 MPa/s. Este ensaio já foi aplicado por Schovanz et al. (2021), Giannini et al. (2018) e Martin et al. (2017) com êxito para mensurar o nível de dano causado por DEF no concreto.

Os corpos de prova utilizados nesse ensaio são cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Na Figura 17 é apresentada a montagem do ensaio com a célula de carga de 300 kN e o posicionamento dos quatro LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) para aquisição dos deslocamentos.

Figura 17 - Instrumentação do corpo de prova para ensaio de SDT



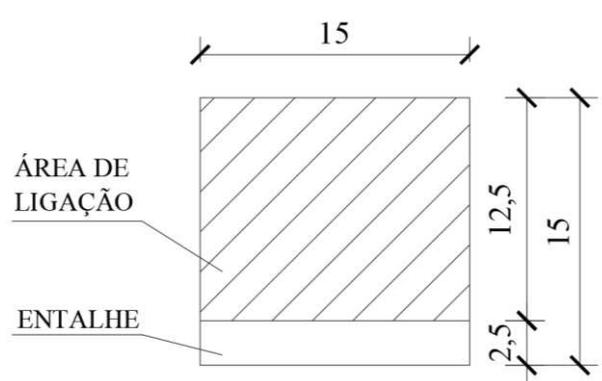
Fonte: Autora.

4.5.5 Energia de fraturamento

O procedimento de ensaio é baseado na recomendação da RILEM 50 FMC que utiliza o método de Hillerborg (1985) para a determinação da energia de fraturamento do concreto pelo ensaio de flexão em três pontos com um entalhe do meio do vão da amostra. A energia de fraturamento é determinada pela energia exigida para a formação de uma fissura de área unitária. Essa área é a área de ligação entre as metades da amostra onde é formada a fissura, representada pela Figura 18.

O ensaio é realizado com corpos de prova prismáticos com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm e com um entalhe central de 2,5 cm de altura, feito com 24 h de antecedência ao ensaio com uma serra circular manual.

Figura 18 - Vista da seção transversal do corpo de prova na região do entalhe (dimensões em centímetros)



Fonte: Autora.

Com o intuito de adquirir os dados e controlar a aplicação de carga, foi utilizado um *clip gauge* posicionado na parte inferior da amostra entre duas chapas metálicas coladas com cola instantânea no entalhe (Figura 19), que propicia uma posição preferencial para a formação da fissura. Se a fissura se formar em outra posição, o ensaio não é válido já que o controle de aplicação de carga fica prejudicado. As chapas possuem dimensões de, aproximadamente, 5 mm x 20 mm x 40 mm e um chanfro em um dos menores lados para encaixe do *clip gauge*.

Figura 19 - Chapas metálicas coladas no corpo de prova



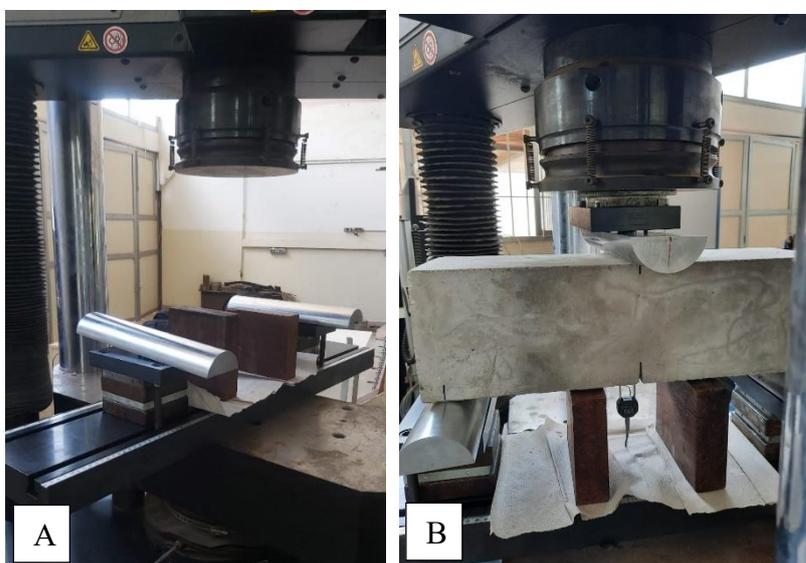
Fonte: Autora.

Após a colagem, a distância entre as chapas foi medida com paquímetro para calibrar o *clip gauge* antes do início do ensaio e, em seguida, atualizada a cada amostra testada.

Primeiramente, foram feitas a limpeza e lubrificação de todas as partes do equipamento, pontos de apoio, aplicação de carga e mesa (Figura 20a). Devem ser removidos quaisquer resíduos, como poeira, graxa e sujidades de ensaios anteriores. Os pontos de apoio devem estar corretamente posicionados, de acordo com a maior dimensão do corpo de prova.

A fim de posicionar o *clip gauge* de forma segura, é necessário levantar os pontos de apoio e colocar madeiras abaixo do corpo de prova, para que, se ele se partir durante o ensaio, não danifique o *clip gauge* (Figura 20b).

Figura 20 - a) Preparação do equipamento; b) Posicionamento do corpo de prova



Fonte: Autora.

O resultado do ensaio é a curva carga *versus* abertura da boca da fissura (*Crack Mouth Opening Displacement* - CMOD) dado pela abertura do entalhe onde o *clip gauge* está posicionado. Como a taxa de deslocamento deve ser mantida constante, o carregamento deve ser feito por uma máquina servo-controlada capaz de aumentar ou diminuir a carga conforme a resposta da amostra. Para a aquisição da curva, é necessário que o equipamento seja capaz de monitorar o amolecimento após a carga máxima e garanta a estabilidade do ensaio.

O corpo de prova é carregado até a ruptura ou até um limite de abertura de 4,0 mm do *clip gauge* e a velocidade de carregamento utilizada é de 0,1 mm/min. A energia de fraturamento (G_1) é calculada pela razão entre a energia absorvida (W) durante o ensaio e a área de ligação (A_{lig}) do corpo de prova (Equação 12). Esta energia absorvida é obtida pela área abaixo do gráfico carga *versus* CMOD.

$$G_I = \frac{W}{A_{lig}} \quad (12)$$

4.6 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

Para confirmação da ocorrência da reação, foram realizadas microscopias eletrônicas de varredura/espectrometria de energia dispersiva de raio X (MEV/EDS) e difratogramas de raio X (DRX) após os níveis de expansão serem atingidos.

Após a ruptura do corpo de prova no ensaio de resistência à compressão, quatro amostras (duas do centro e duas da extremidade) foram escolhidas aleatoriamente para a análise por MEV/EDS para todos os traços e níveis de expansão. As amostras com dimensões de 1 a 2 cm² foram identificadas e armazenadas individualmente em sacos zip em um recipiente tampado de vidro com sílica gel na geladeira (temperatura de 14 °C aproximadamente), com o intuito de manter as condições de reação estáveis até a realização da análise.

As microscopias foram realizadas no Laboratório de Multiusuários do Instituto de Química da UFU. A metalização das amostras com ouro foi feita no equipamento Leica EM SCD050 e o microscópio eletrônico utilizado modelo Vega3, marca Tescan.

A identificação da ocorrência de DEF foi feita através da morfologia do composto em regiões preferenciais de formação (poros, fissuras e zona de transição agregado/pasta) utilizando 5 ampliações padronizadas: 15, 10, 5, 2,5 e 1 kx. Também foram realizados mapeamentos dos elementos químicos nos locais onde havia uma possível formação de etringita tardia.

As amostras para o ensaio de DRX foram retiradas do mesmo corpo de prova utilizado para a MEV/EDS. O concreto foi moído por 15 segundos em um moinho de disco oscilante da marca Herzog, modelo HSM 100 H. O material foi peneirado primeiro em uma peneira de malha metálica de abertura 150 µm para retirar os grãos maiores e em seguida peneirado na peneira de 75 µm de abertura. Do material passante na segunda peneira, foram retirados dois tubos Eppendorf cheios, identificados e armazenados da mesma maneira que as amostras da MEV até a realização da análise.

Os difratogramas foram realizados no Laboratório Multiusuários de Química da Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raio-X em pó da marca Shimadzu, modelo XRD6000, com radiação $\text{CuK}\alpha$.

Os parâmetros de análise foram: modo Fixed Time de 2 segundos, faixa de varredura 2θ de 5 a 70° e passo de $0,016^\circ$. As fendas utilizadas foram: fenda divergente e de dispersão de 1° e fenda receptora de 0,3 mm. Os resultados foram plotados no software OriginPro 8.5. A identificação dos compostos presentes nas amostras foi feita com base na posição e intensidade dos picos comparados com o banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD).

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

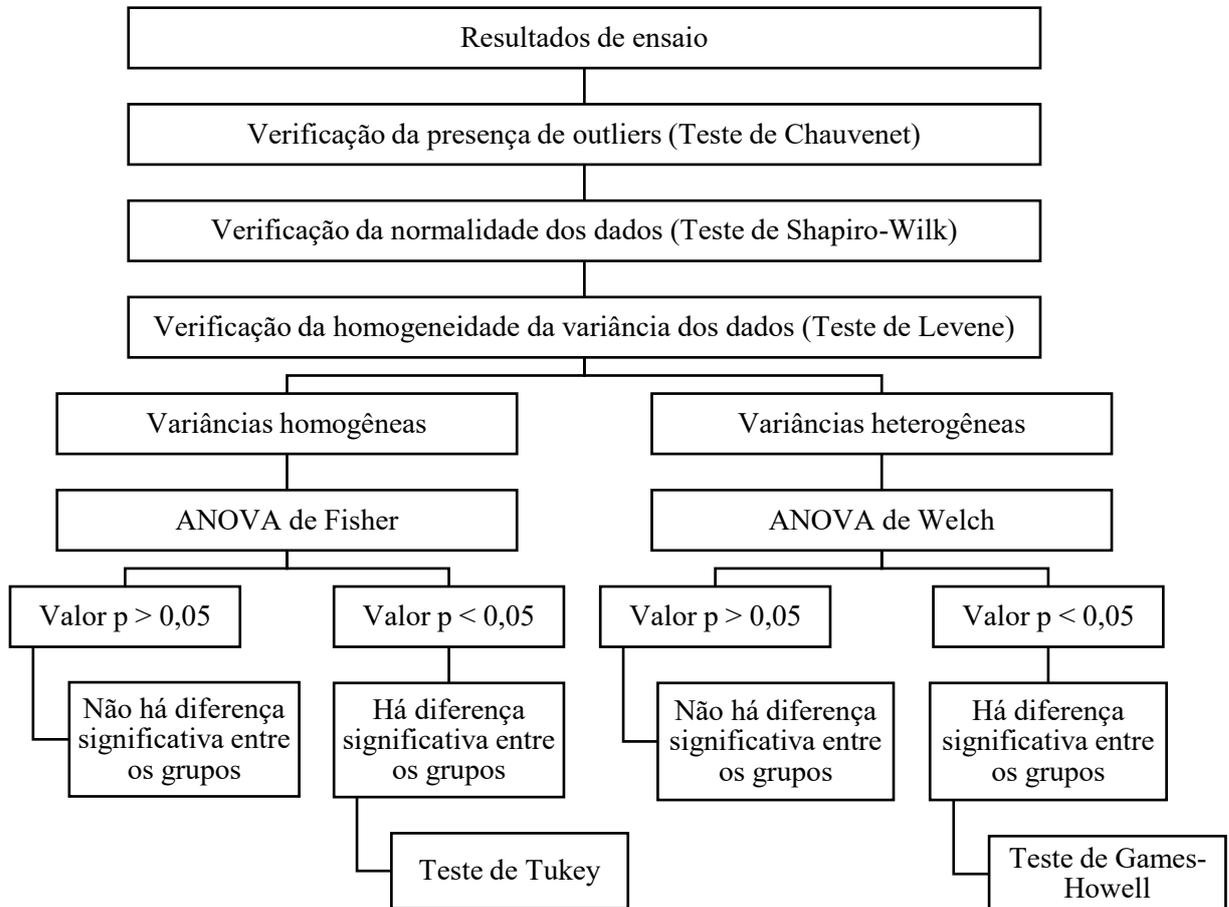
Os resultados foram analisados estatisticamente a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) com o intuito de confirmar ou não possíveis diferenças significativas no comportamento das amostras de concreto devido à formação de etringita tardia. O software livre utilizado na análise estatística foi o Jamovi 2.3.28. Na Figura 21 está apresentado o fluxograma com as verificações utilizadas na análise estatística.

Inicialmente, a presença de *outliers* foi avaliada através do teste de Chauvenet. A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar possíveis diferenças significativas entre os grupos de expansões. Os pressupostos de distribuição normal dos dados e homogeneidade das variâncias para a utilização da ANOVA foram analisados pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente.

Nos dados normais e com homogeneidade de variâncias, foi executado a ANOVA de Fisher para verificar a existência de diferença significativa entre os grupos de expansão e nos casos positivos, foi utilizado o teste de Tukey para a identificação dessa diferença entre cada combinação de nível de expansão.

Nos dados normais e com não homogeneidade de variâncias foi executado a ANOVA de Welch para verificar a existência de diferença significativa entre os grupos de expansão e nos casos positivos, foi utilizado o teste de Games-Howell para a identificação dessa diferença entre cada combinação de nível de expansão.

Figura 21 - Fluxograma para análise estatística



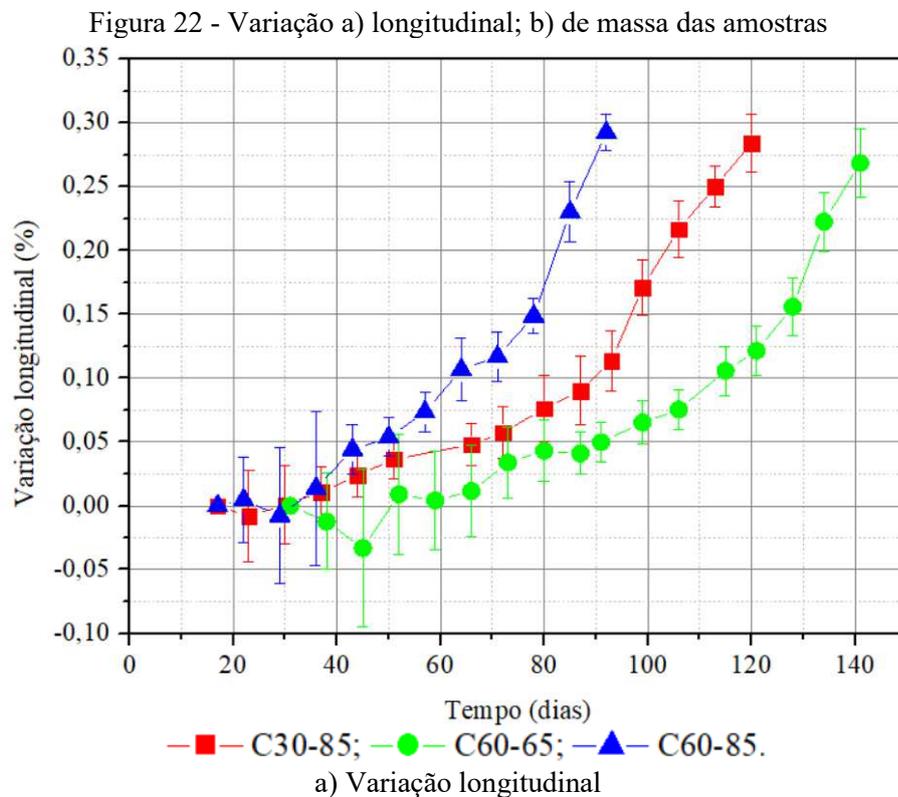
Fonte: Autora.

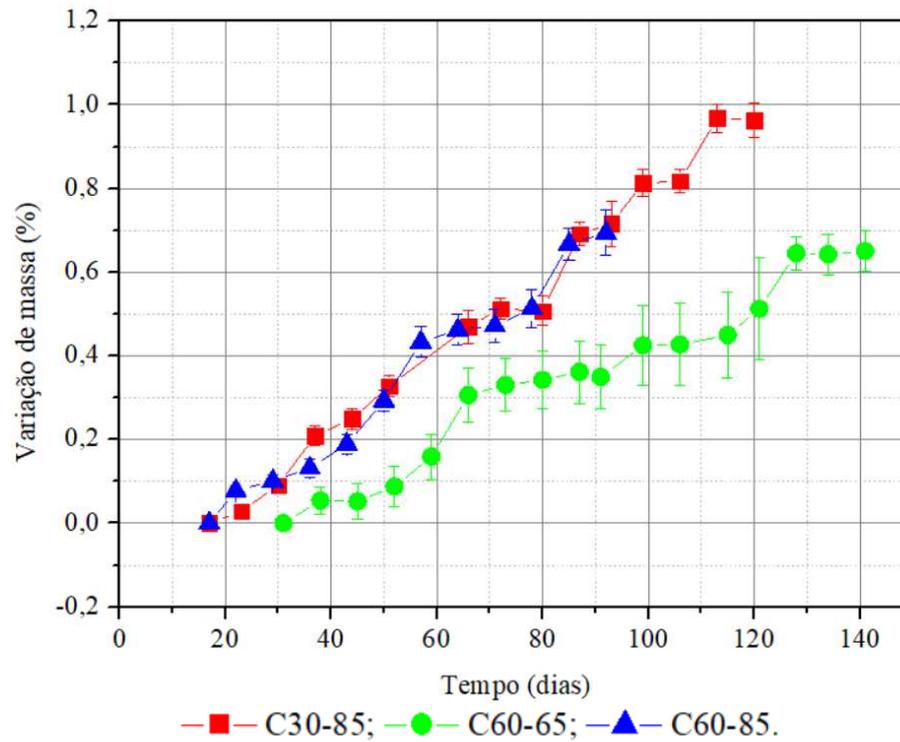
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência serão apresentados os resultados do monitoramento dimensional e de massa dos corpos de prova, bem como os resultados dos ensaios mecânicos com a avaliação estatística e análises microestruturais realizados. No Apêndice A estão apresentados os resultados individuais, média e desvio padrão dos ensaios mecânicos realizados.

5.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA

Na Figura 22 está apresentada as leituras longitudinais e de massa semanais realizadas nos três grupos de traço-temperatura avaliados. É possível observar que o grupo C60-85 teve a expansão longitudinal mais rápida que os demais, atingindo 0,3% em aproximadamente 90 dias após a moldagem. Já o grupo C30-85 alcançou o último nível de expansão por volta de 120 dias após a moldagem e o grupo C60-65 completou 0,3% de expansão em cerca de 140 dias.





b) Variação de massa.

Fonte: Autora.

Esses diferentes tempos de expansão podem ser explicados devido a dois fatores principais: consumo de cimento por metro cúbico, ligado à disponibilidade de material para a reação, e temperatura máxima de cura, ligada à dissolução da etringita primária. O concreto com 60 MPa de resistência à compressão possuía um consumo de 522,61 kg/m³ que, aliado à temperatura máxima de cura de 85 °C, produziu a expansão mais rápida. Por outro lado, a temperatura de 65 °C foi capaz de provocar expansão, mas de forma mais lenta. O concreto de 30 MPa possuía um consumo de 358,05 kg/m³, que junto com a temperatura de 85 °C resultou em uma expansão intermediária em relação aos demais.

No Apêndice B estão plotados os gráficos individuais de variação longitudinal e de massa de cada grupo estudado e no Apêndice C estão apresentadas fotos das observações de sintomas de manifestação patológica, como fissuras e poros com material esbranquiçado.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como parâmetro para a verificação do traço, foram feitos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias da moldagem em amostras de todos os grupos antes da expansão começar a ser monitorada, com resultados apresentados na Tabela 8. Na Tabela 9 e na Figura 23 estão

apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto nos níveis de expansão avaliados. É possível notar que, inicialmente, em todos os grupos houve uma queda e posterior crescimento da resistência em relação ao nível 0% de expansão. Comparando os valores médios do nível 0 e 0,3% de expansão, houve uma redução de 14,35% no grupo C30-85 e um crescimento de 18,45% no grupo C60-65 e 9,61% no grupo C60-85.

Tabela 8 - Resistência à compressão aos 7 dias, em MPa.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão			
	0,0	0,05	0,12	0,30
C30 85°C	22,04 ± 2,86	18,40 ± 1,80	17,89 ± 1,30	19,50 ± 1,17
C60 65°C	56,47 ± 2,38	52,43 ± 3,39	58,83 ± 2,57	56,60 ± 1,25
C60 85°C	56,23 ± 0,89	50,39 ± 1,26	51,70 ± 1,35	58,61 ± 0,62

Fonte: Autora.

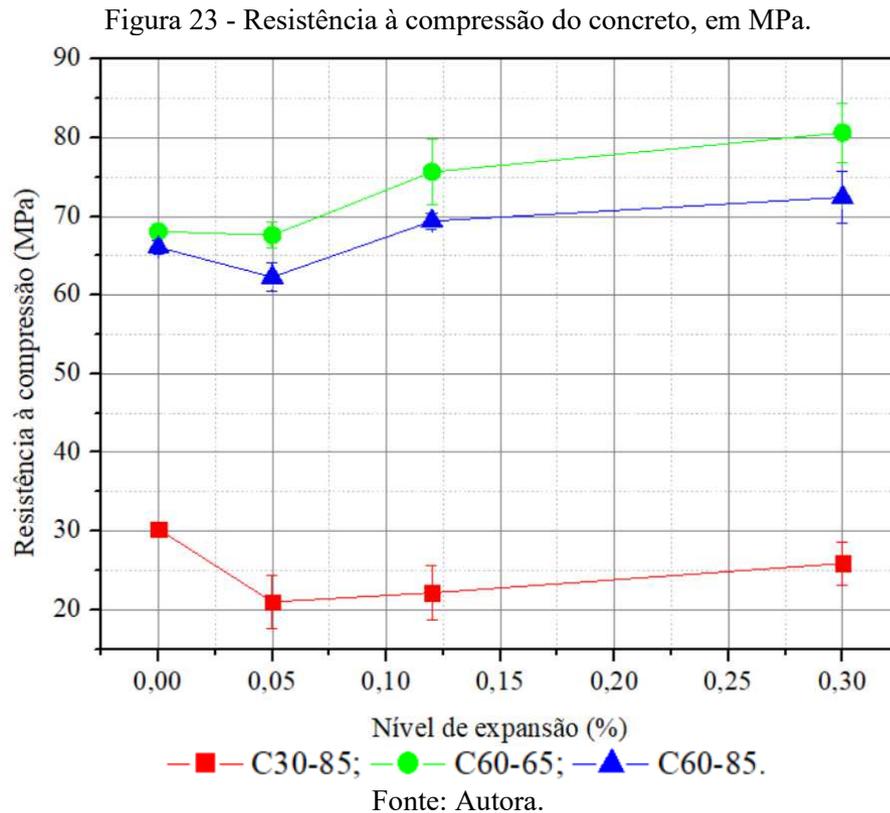
A literatura indica que normalmente a DEF reduz as propriedades mecânicas do concreto, como nas pesquisas de Hasparyk et al. (2022), Joshi et al. (2022), Schovanz et al. (2021) e Giannini et al. (2018). Nestes artigos, a redução da resistência à compressão foi por volta de 27% em 0,3% de expansão. Por outro lado, os trabalhos citados utilizaram concretos com resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa e ainda não há publicações sobre a formação de etringita tardia em concretos de resistência à compressão acima de 50 MPa. Além disso, os estudos foram conduzidos até níveis de expansão maiores.

Bragança et al. (2021) avaliaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade em argamassas com DEF e RAA em conjunto utilizando o CP V ARI. Aos 28 dias, 3 meses e 6 meses a resistência à compressão era de aproximadamente 45 MPa, 41 MPa e 50 MPa, nessa ordem e a expansão das amostras nessas idades estava em cerca de 0,01, 0,045 e 0,19%, respectivamente. Diferente dos estudos citados anteriormente, houve um crescimento de 11% nesta propriedade, mesmo com a expansão.

Tabela 9 - Resistência à compressão do concreto, em MPa.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	30,24 ± 0,28	20,97 ± 3,44	22,13 ± 3,51	25,90 ± 2,72
C60-65	68,08 ± 0,74	67,61 ± 1,62	75,66 ± 4,10	80,64 ± 3,64
C60-85	66,08 ± 0,85	62,29 ± 1,87	69,39 ± 1,05	72,43 ± 3,34

Fonte: Autora.



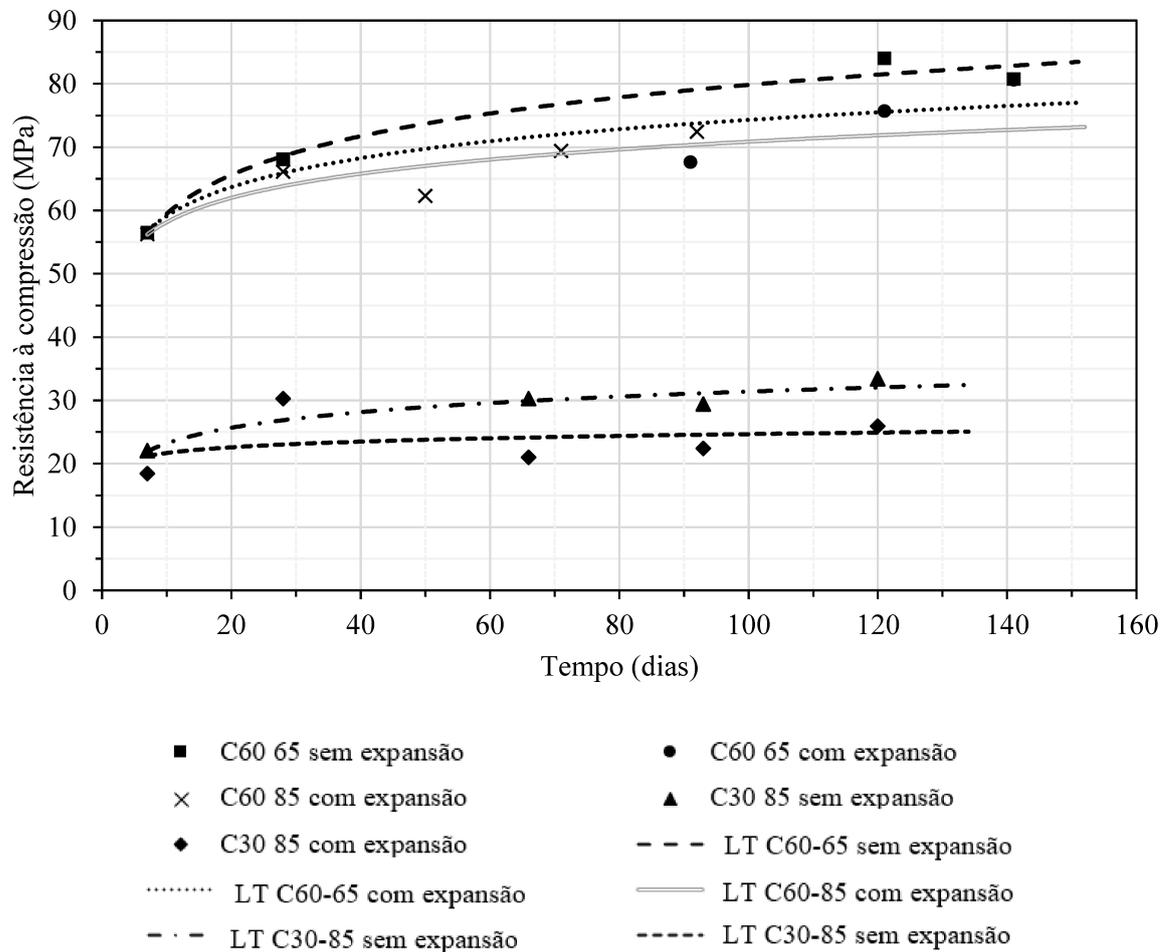
Como os resultados das amostras com expansão não estavam de acordo com a literatura, foram ensaiados dois corpos de prova do nível 0% de expansão no mesmo dia de ensaio dos níveis 0,12 e 0,3% dos grupos C30-85 (93 e 120 dias da moldagem, nessa ordem) e C60-65 (121 e 141 dias da moldagem, respectivamente). Com esses valores e com os resultados de 7 e 28 dias foi feito um ajuste por linha de tendência logarítmica (LT) para estimar qual seria a resistência do concreto sem a expansão. Na Figura 24 estão apresentados os valores médios de ensaio e a linhas de tendência de cada grupo, com e sem expansão.

Apesar dos valores apresentarem um crescimento em relação aos 28 dias, é possível observar que os resultados das amostras com expansão se encontram abaixo da linha da resistência esperada para a idade e pela projeção da LT dos dados com expansão, a resistência tende a se afastar mais dos valores sem expansão.

Com base na ANOVA, o ensaio de resistência à compressão apresentou diferença significativa entre os níveis de expansão dos três grupos estudados. Para o grupo C30-85, o teste de Tukey indicou diferença somente entre os níveis de expansão 0 e 0,05% e 0 e 0,12%. Nos grupos C60-65 e C60-85 houveram diferença entre os níveis 0 e 0,3%, 0,05 e 0,12% e 0,05 e 0,3%.

Isso demonstra que este ensaio foi afetado tanto pela formação de etringita tardia, quanto pelo ganho de resistência consequente à hidratação contínua do cimento.

Figura 24 - Gráfico de estimativa de resistência à compressão



Fonte: Autora.

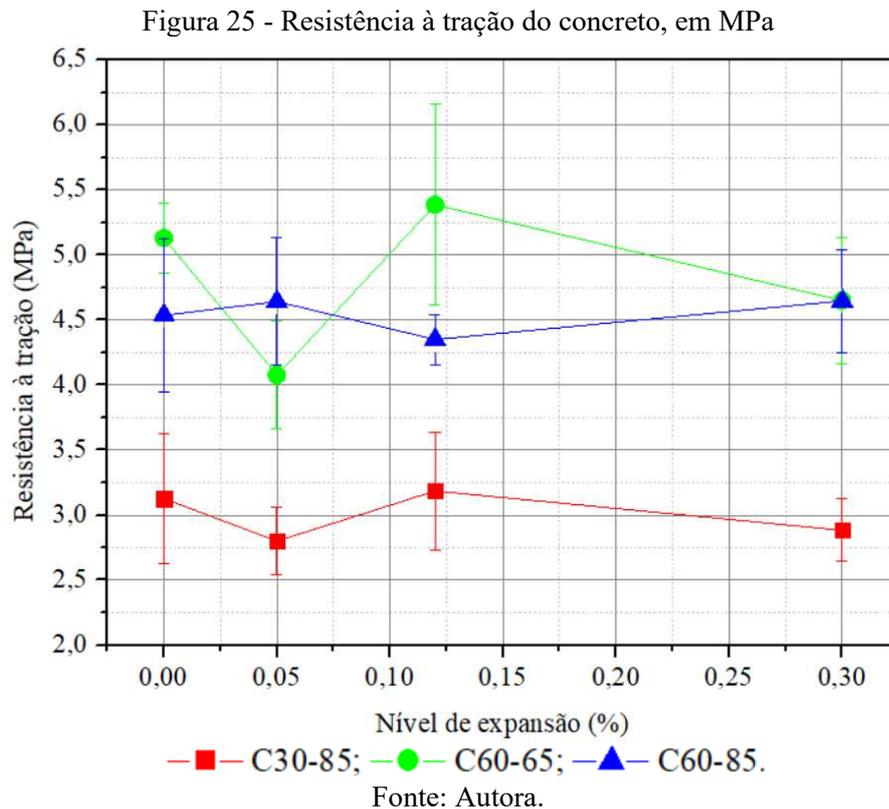
5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Tabela 10 e na Figura 25 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração do concreto por compressão diametral nos níveis de expansão analisados. Esta propriedade apresentou comportamento semelhante à resistência à compressão, mas, na análise de variância dos resultados não houve diferença significativa em nenhum dos três grupos avaliados, também possivelmente pela hidratação do cimento que dissimulou o dano esperado.

Tabela 10 - Resistência à tração do concreto, em MPa.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	3,13 ± 0,50	2,80 ± 0,26	3,19 ± 0,45	2,88 ± 0,24
C60-65	5,13 ± 0,27	4,08 ± 0,41	5,39 ± 0,77	4,65 ± 0,49
C60-85	4,54 ± 0,59	4,64 ± 0,49	4,35 ± 0,19	4,65 ± 0,40

Fonte: Autora.



Em relação à resistência à tração, Hasparyk et al. (2022) e Schovanz et al. (2021) obtiveram uma redução de 31% aos 56 dias de expansão, em comparação aos 28 dias. Para Sanchez et al. (2018), esta característica é mais influenciada por mecanismos expansivos como DEF e RAA do que a resistência à compressão, principalmente em níveis moderados de expansão (menores que 0,3%).

5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

Na Tabela 11 e na Figura 26 estão apresentados os resultados do módulo de elasticidade estático nos níveis de expansão avaliados. O grupo C30-85 apresentou uma redução de 25,67% entre os níveis 0 e 0,3% de expansão, enquanto os grupos C60-65 e C60-85 a queda foi de apenas 3,64% e 3,77%, nesta ordem. Considerando que a resistência à compressão dos concretos de 60 MPa

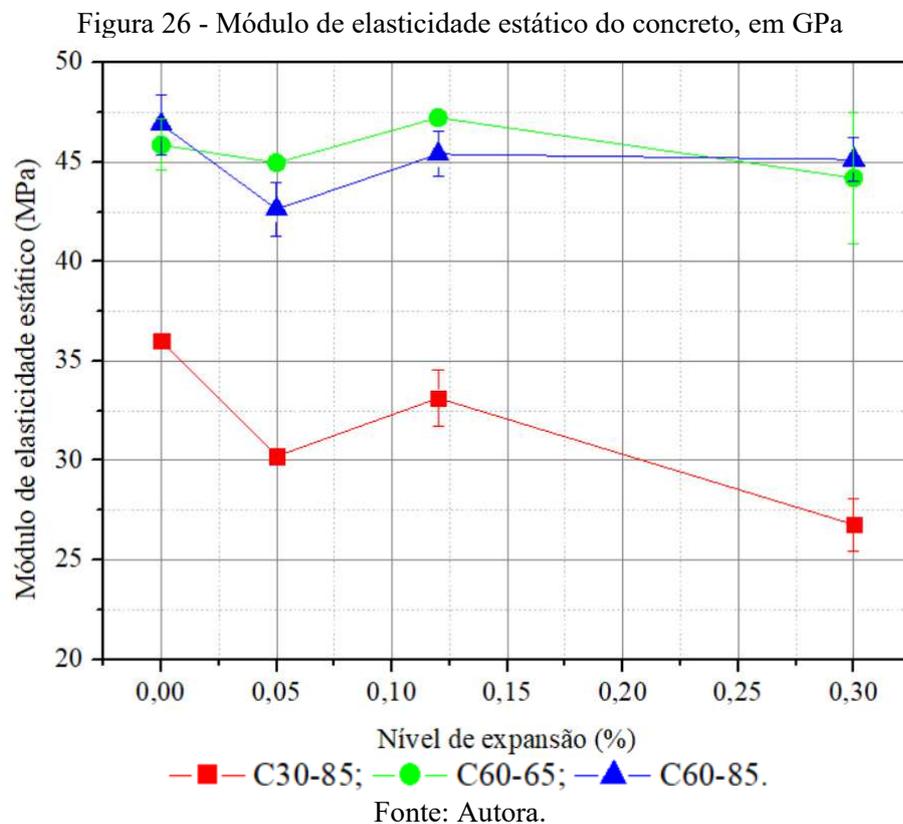
teve um crescimento mesmo com a expansão, possivelmente por esta razão o módulo estático não foi afetado como o concreto de 30 MPa.

O ensaio de módulo de elasticidade estático apresentou diferença significativa na ANOVA apenas nos grupos C30-85 e C60-85. De acordo com o teste de Games-Howell, no primeiro grupo esta diferença está presente entre os níveis 0 e 0,05%, 0 e 0,3%, 0,05 e 0,3% e 0,12 e 0,3%. Já no segundo grupo, pelo teste de Tukey, a diferença se apresenta apenas entre os níveis 0 e 0,05%. Assim como para a resistência à compressão, o módulo de elasticidade teve sensibilidade para captar as alterações no concreto com a expansão, devido ao preenchimento dos poros pela etringita tardia e pela melhoria na qualidade da matriz cimentícia com a hidratação.

Tabela 11 - Módulo de elasticidade estático do concreto, em GPa.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	36,03 ± 0,21	30,21 ± 0,35	33,13 ± 1,44	26,78 ± 1,31
C60-65	45,87 ± 1,29	44,97 ± 0,15	47,23 ± 0,38	44,20 ± 3,30
C60-85	46,90 ± 1,51	42,63 ± 1,36	45,40 ± 1,13	45,13 ± 1,12

Fonte: Autora.



Dentre as propriedades mecânicas do concreto, o módulo de elasticidade geralmente é a mais afetada pelo desenvolvimento de reações expansivas. Sanchez et al. (2018) obtiveram reduções entre 50 e 65 % em níveis de expansão de 0,3 a 0,4%. No estudo de Giannini et al. (2018), foram avaliados dois traços diferentes quanto a formação de etringita tardia. No primeiro, houve uma redução de 64% do módulo de elasticidade em 0,34% de expansão e no segundo esta redução foi de 21% para 0,33% de expansão.

Assim como nos resultados de resistência à compressão citados anteriormente do estudo de Bragança et al. (2021), nos níveis de expansão de 0,01, 0,045 e 0,19%, o módulo de elasticidade apresentou valores próximos de 26, 22,5 e 27,5 GPa, respectivamente, indicando que esta propriedade não foi influenciada pelas reações expansivas como nos trabalhos de Sanchez et al. (2018) e Giannini et al. (2018).

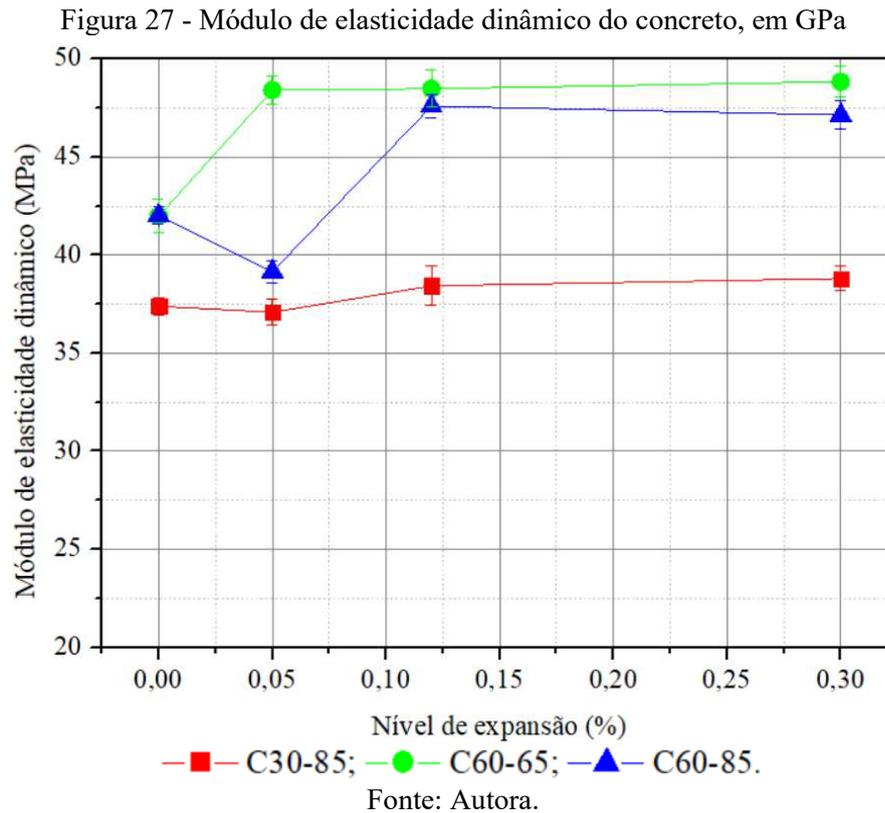
Na Tabela 12 e na Figura 27 estão apresentados os resultados médios e de desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico. Por outro lado, o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico apontou diferença significativa entre os três grupos estudados de acordo com a análise de variância. Pelo teste de Games-Howell, há diferença entre os níveis 0 e 0,12%, 0 e 0,3%, 0,05 e 0,12% e 0,05 e 0,3% no grupo C30-85. O teste de Tukey indicou diferença entre os níveis 0 e 0,05%, 0 e 0,12% e 0 e 0,3% no grupo C60-65 e no grupo C60-85 a diferença está entre os níveis 0 e 0,05%, 0 e 0,12%, 0 e 0,3% e 0,05 e 0,12%.

Apesar dos resultados da análise de variância, o módulo de elasticidade dinâmico também não sofreu as reduções esperadas. Ouvrier-Bufferet et al. (2021) obtiveram resultados semelhantes, em que aos 150 dias o concreto apresentava uma expansão de 0,21%, mas não houve redução das propriedades mecânicas avaliadas. A hipótese dos autores foi que a DEF observada pela MEV na zona de transição agregado/pasta preencheu a região causando expansão sem provocar enfraquecimento do concreto.

Tabela 12 - Módulo de elasticidade dinâmico do concreto, em GPa.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	37,40 ± 0,44	37,09 ± 0,65	38,44 ± 1,00	38,80 ± 0,64
C60-65	42,00 ± 0,84	48,41 ± 0,75	48,49 ± 0,95	48,84 ± 0,80
C60-85	42,03 ± 0,44	39,16 ± 0,57	47,60 ± 0,62	47,14 ± 0,71

Fonte: Autora.



5.5 STIFFNESS DAMAGE TEST

Nas Figuras 28, 29 e 30 estão apresentados os gráficos tensão-deformação dos grupos C30-85, C60-65 e C60-85, respectivamente, em todos os níveis de expansão. É possível notar que mesmo com a expansão, não houve aumento da área de histerese para os níveis de expansão avaliados.

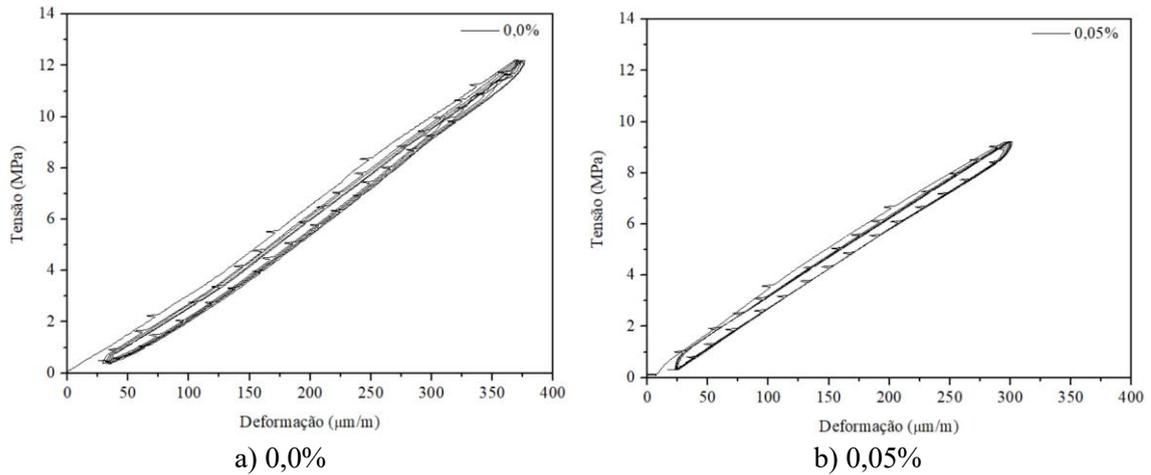
Giannini et al. (2018) argumentaram que, com o crescimento da expansão, é possível notar que há um aumento na área de histerese (energia dissipada) do primeiro ciclo de carregamento no gráfico tensão-deformação do ensaio, conforme demonstrado na Figura 31.

Na Tabela 13 e na Figura 32 estão apresentados os valores médios e de desvio padrão do SDI e na Tabela 14 e na Figura 33 estão apresentados os valores médios e de desvio padrão do PDI dos grupos estudados, onde é possível perceber a semelhança dos índices mesmo com o avanço da expansão.

Na Tabela 15 estão apresentados os valores dos índices SDI e PDI em concretos com reações expansivas dos estudos de Zahedi et al. (2022), Hasparyk et al. (2022), Sanchez et al. (2018) e

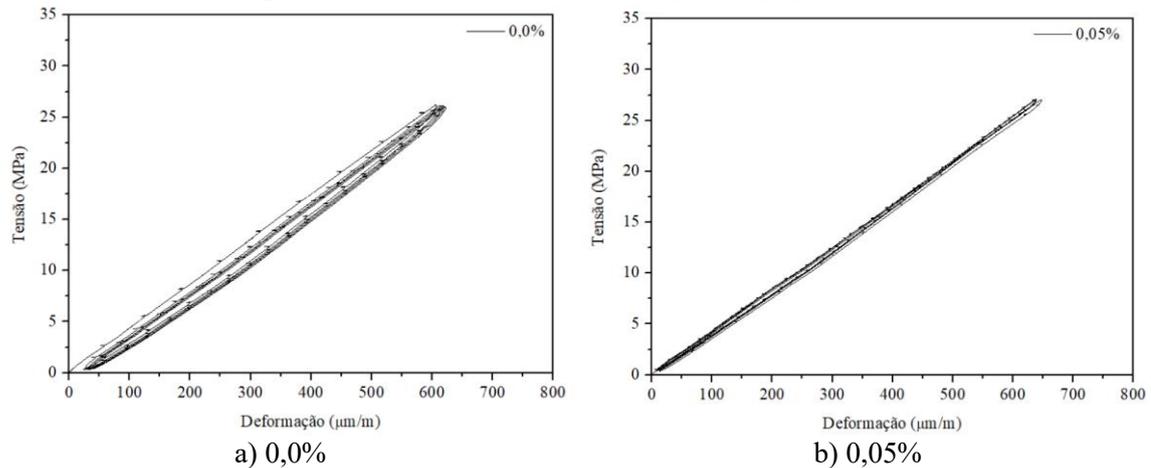
Giannini et al. (2018). É possível observar uma relação diretamente proporcional entre os índices e as expansões, mesmo em diferentes reações expansivas, lembrando que as resistências à compressão destes trabalhos estão entre 30 e 40 MPa.

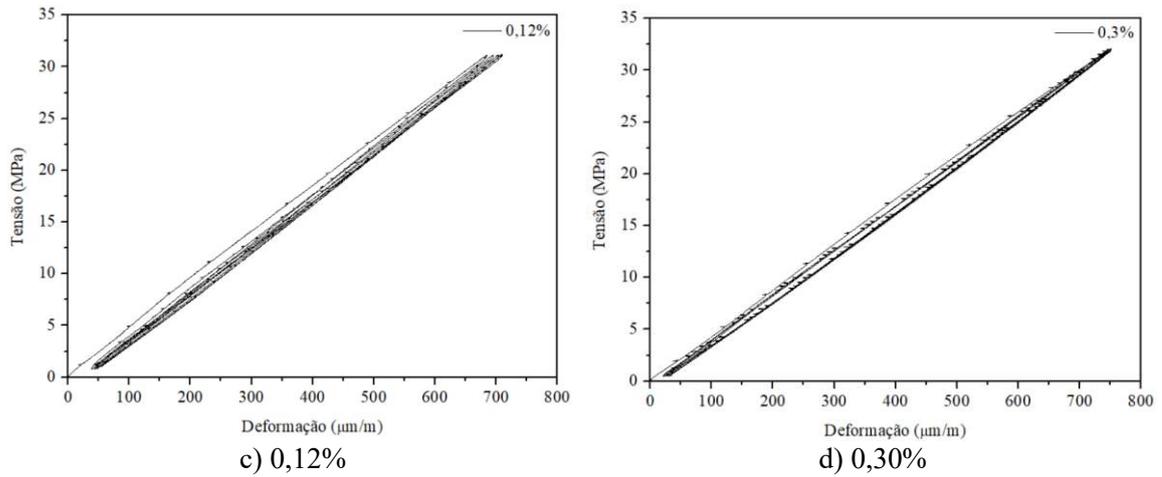
Figura 28 - Gráficos tensão-deformação do grupo C30-85



Fonte: Autora.

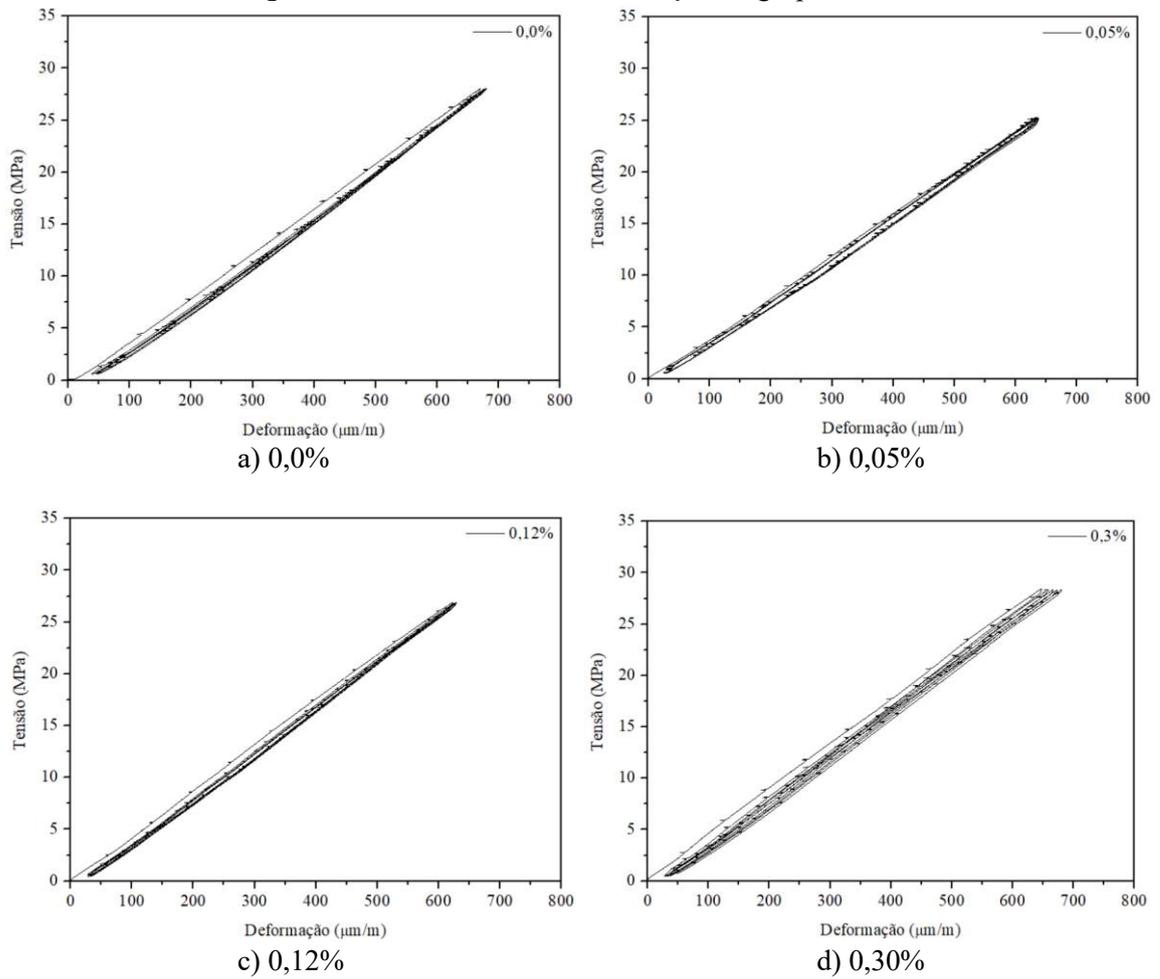
Figura 29 - Gráficos tensão-deformação do grupo C60-65





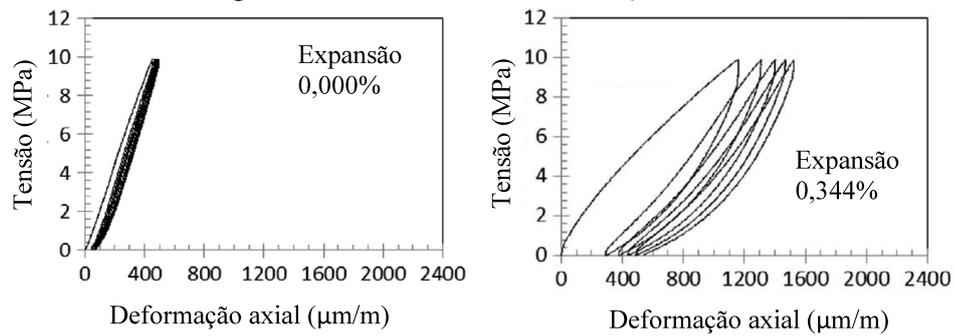
Fonte: Autora.

Figura 30 - Gráficos tensão-deformação do grupo C60-85



Fonte: Autora.

Figura 31 - Gráfico tensão-deformação do SDT



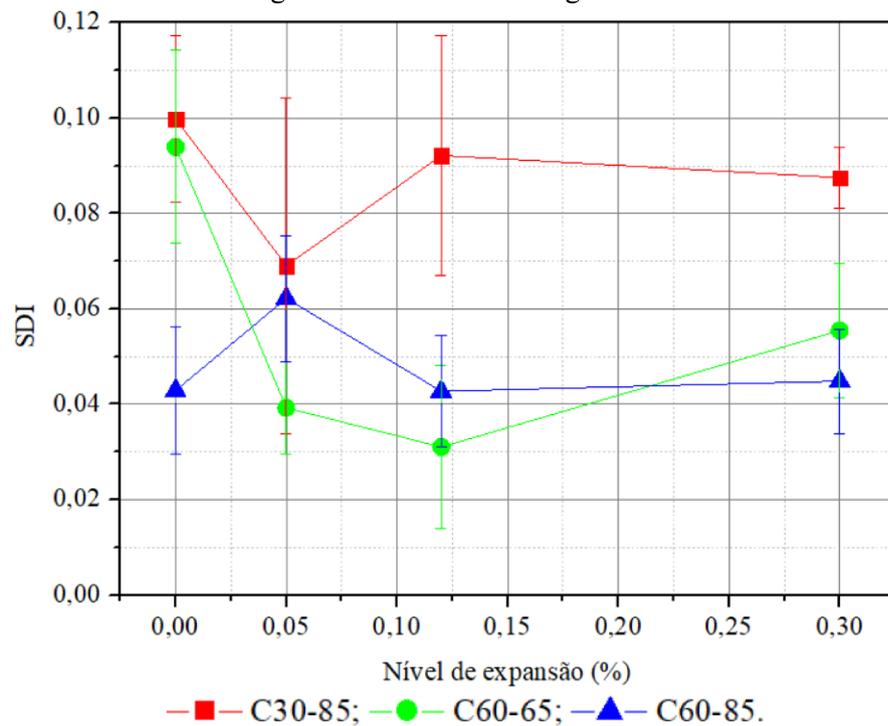
Fonte: Adaptado de Giannini et al. (2018).

Tabela 13 - Stiffness Damage Index.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	0,10 ± 0,02	0,07 ± 0,04	0,09 ± 0,03	0,08 ± 0,01
C60-65	0,09 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,06 ± 0,01
C60-85	0,04 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01

Fonte: Autora.

Figura 32 - Stiffness Damage Index



Fonte: Autora.

Tabela 14 - Plastic Deformation Index.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	0,13 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,11 ± 0,03
C60-65	0,07 ± 0,01	0,04 ± 0,03	0,08 ± 0,06	0,06 ± 0,05
C60-85	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,02

Fonte: Autora.

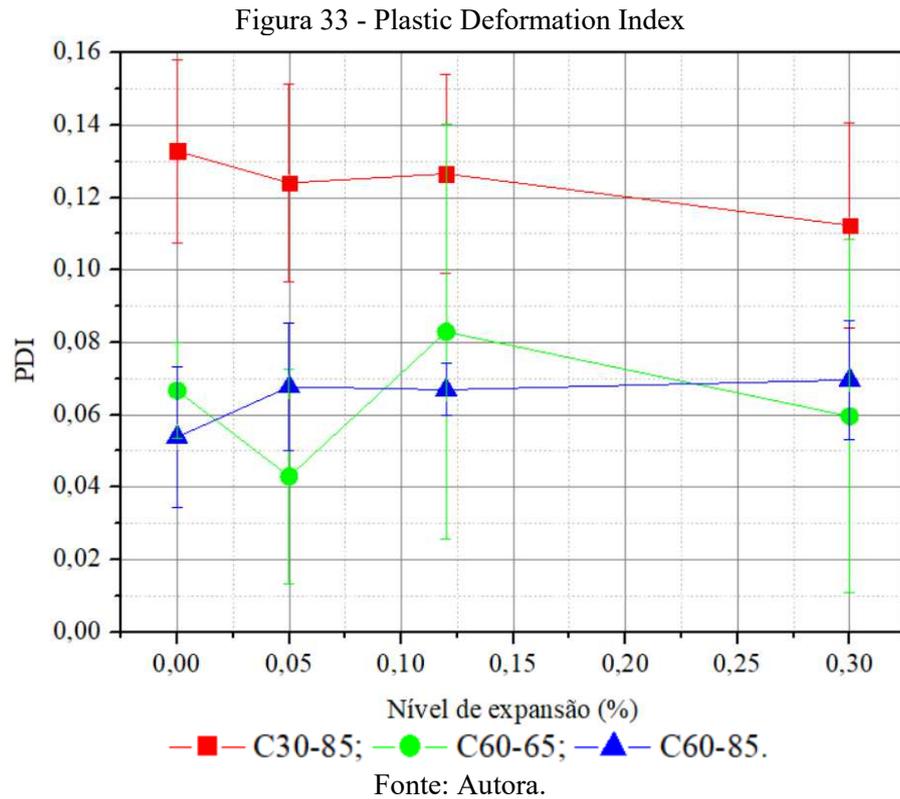


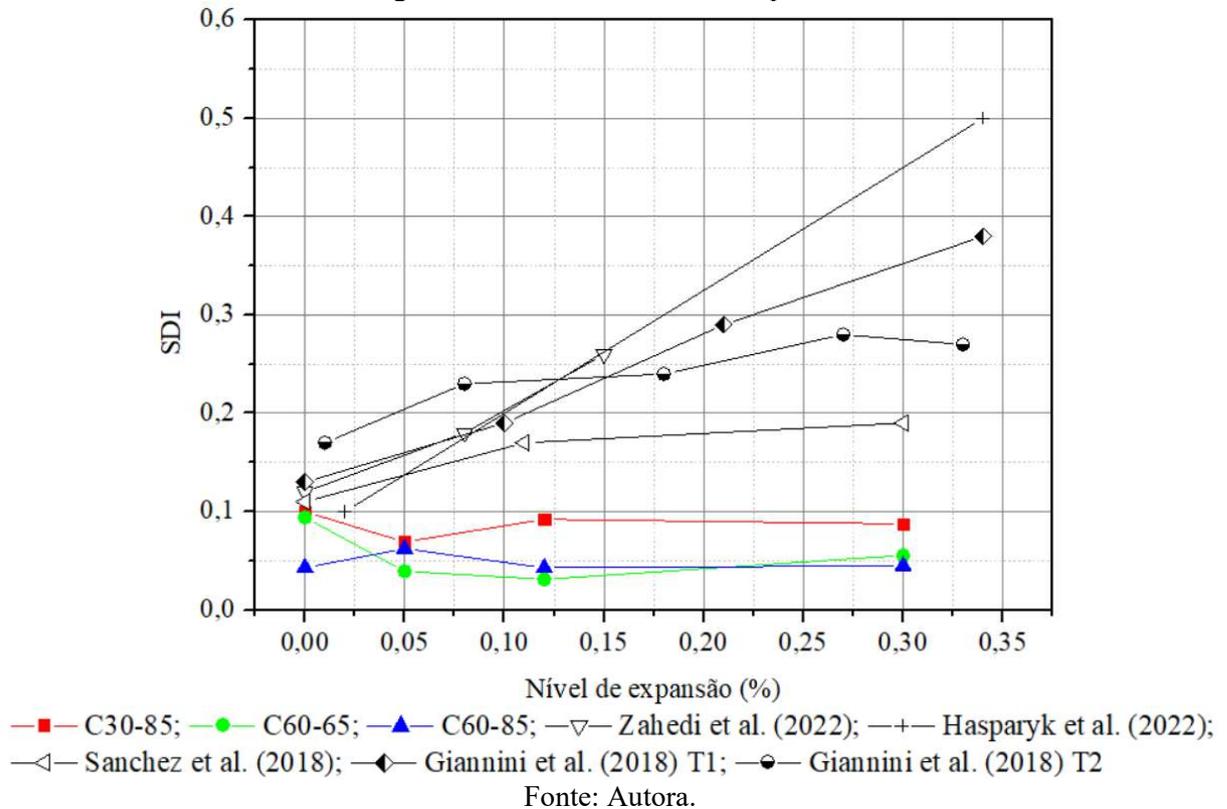
Tabela 15 - Índices obtidos com o Stiffness Damage Test.

Autores	Mecanismo expansivo	Nível de expansão (%)	SDI	PDI
Zahedi et al. (2022)	RAS	0,0	0,12	0,08
		0,08	0,18	0,13
		0,15	0,26	0,24
Hasparyk et al. (2022)	DEF	0,02	0,10	0,01
		0,34	0,50	0,22
Sanchez et al. (2018)	DEF e RAS	0,0	0,11	0,09
		$0,11 \pm 0,01$	0,17	0,15
		$0,3 \pm 0,01$	0,19	0,18
Giannini et al. (2018)	DEF - traço 1	0,0	0,13	0,13
		0,10	0,19	0,18
		0,21	0,29	0,25
		0,34	0,38	0,36
	DEF - traço 2	0,01	0,17	0,15
		0,08	0,23	0,24
		0,18	0,24	0,18
		0,27	0,28	0,25
		0,33	0,27	0,23

Fonte: Autora.

Nas Figura 34 e Figura 35 estão plotados os índices SDI e PDI dos grupos em relação à expansão e também os índices dos trabalhos citados na Tabela 15. Através da análise das figuras, percebe-se que não houve o aumento esperado nos índices na medida que as expansões foram ocorrendo.

Figura 34 - Gráfico SDI versus expansão

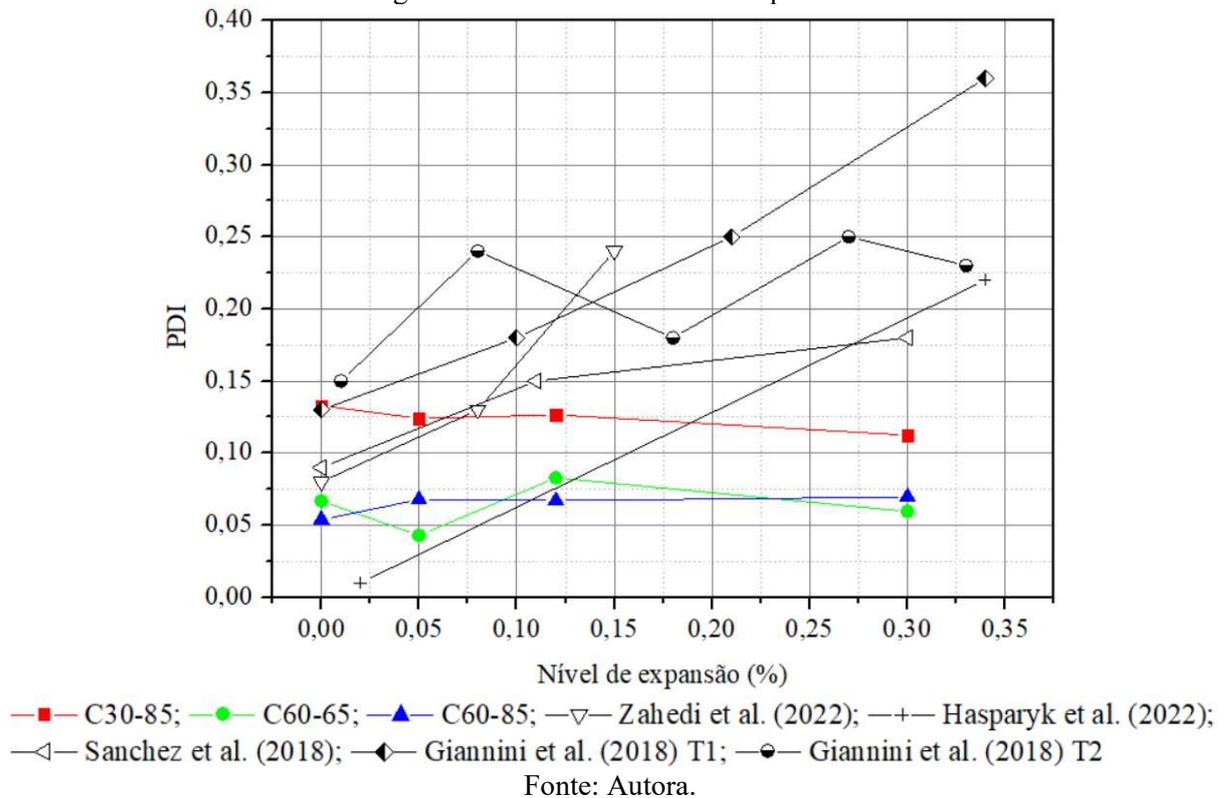


Isso possivelmente se deve ao ganho de resistência à compressão das amostras com o tempo que provavelmente dissimulou o dano que a etringita tardia geralmente causa, para os grupos de 60 MPa. Esse ganho de resistência pode ter sido causado pelo alto consumo de cimento por metro cúbico e baixa relação água/cimento do traço utilizado que contribuiu para o progresso da hidratação mesmo após os 28 dias de idade.

Por outro lado, o grupo de 30 MPa também não demonstrou alteração nos índices, apesar do decréscimo da resistência à compressão. Esse comportamento pode indicar um problema mais complexo de se esclarecer. A hipótese é que houve uma perda de deformações no equipamento utilizado para a fixação dos LVDTs, visto que em carregamentos e expansões diferentes, as deformações permaneceram semelhantes.

O Stiffness Damage Index apresentou diferença significativa apenas no grupo C60-65 de acordo com a análise de variância e o teste de Tukey indicou que esta diferença está entre os níveis 0 e 0,05%, 0 e 0,12% e 0 e 0,3%. O Plastic Deformation Index não apresentou diferença significativa em nenhum grupo pela análise de variância.

Figura 35 - Gráfico PDI versus expansão

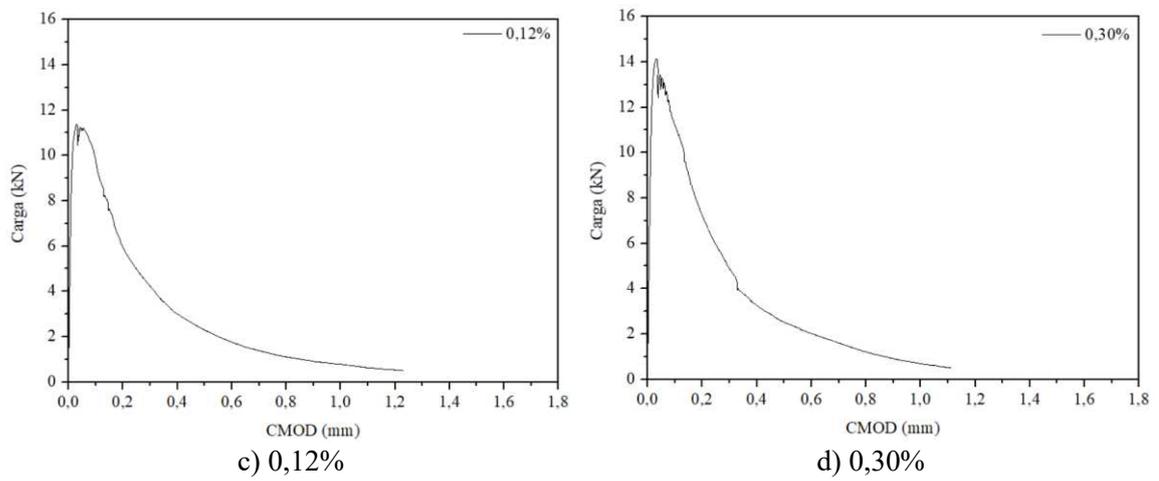
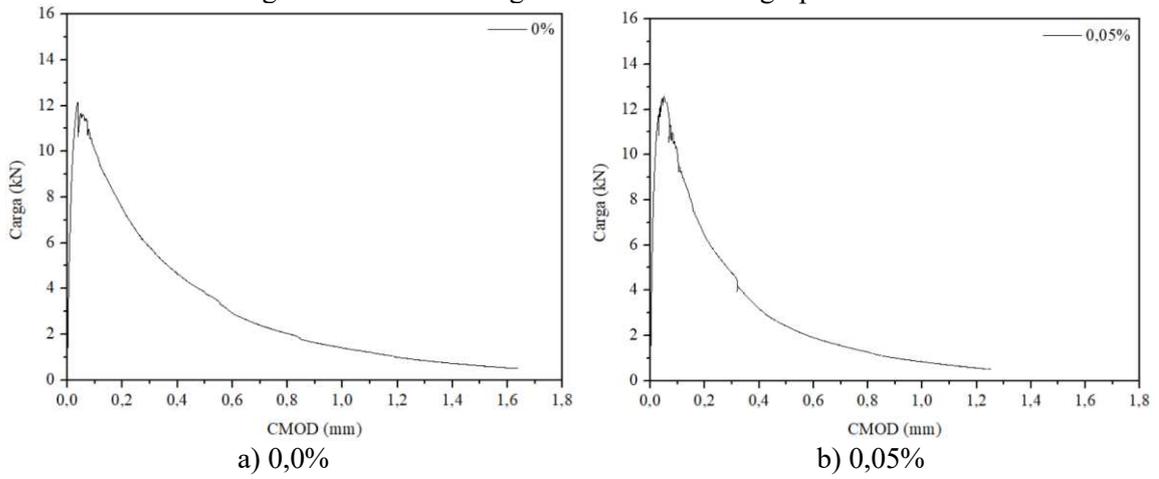


5.6 ENERGIA DE FRATURAMENTO

Hu e Yin (2022) avaliaram o desempenho à fratura do concreto perante ataque por sulfato externo e ciclos de gelo/degelo. Foi observado uma redução no pico de carga antes do amolecimento e um aumento da CMOD final no decorrer dos ciclos. Porém, o ASE é um mecanismo expansivo de química muito diferente da DEF, mesmo possuindo o mesmo produto final. Por isso não é razoável associar o comportamento à fratura desses mecanismos distintos. Até o momento, não há estudos sobre DEF e energia de fraturamento em concretos na literatura.

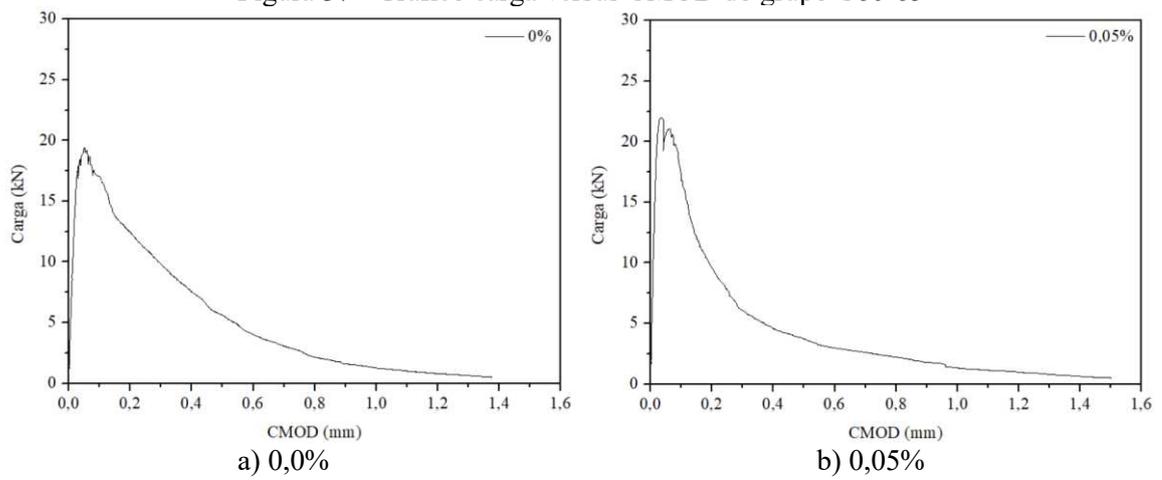
Nas Figuras 36, 37 e 38 estão apresentados os gráficos carga versus CMOD dos três grupos em relação aos níveis de expansão. Para o grupo C30-85, não houve mudança significativa no carregamento máximo suportado antes do amolecimento, mas é possível notar uma redução na CMOD final com o avanço da expansão. No grupo C60-65, o carregamento máximo teve um aumento nos dois últimos níveis e uma redução no CMOD, em relação aos dois primeiros níveis. O grupo C60-85 teve um comportamento semelhante ao C30-85, com carregamento máximo semelhante e redução na CMOD com a expansão.

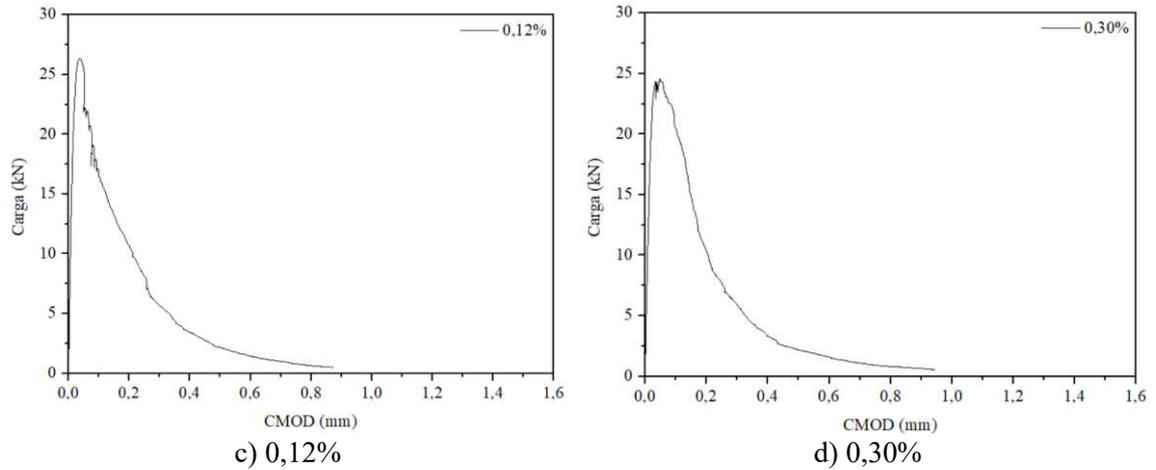
Figura 36 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C30-85



Fonte: Autora.

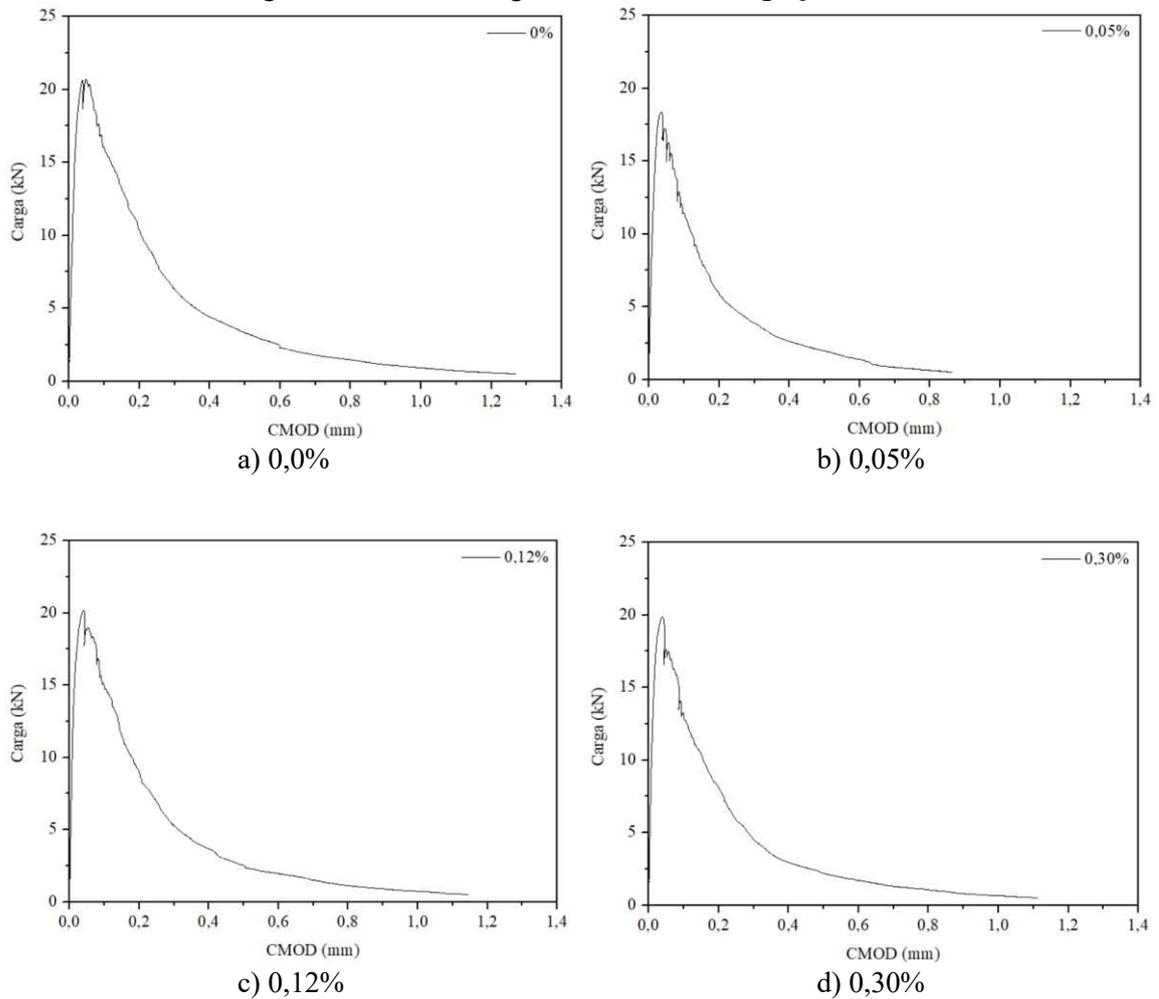
Figura 37 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C60-65





Fonte: Autora.

Figura 38 - Gráfico carga versus CMOD do grupo C60-85



Fonte: Autora.

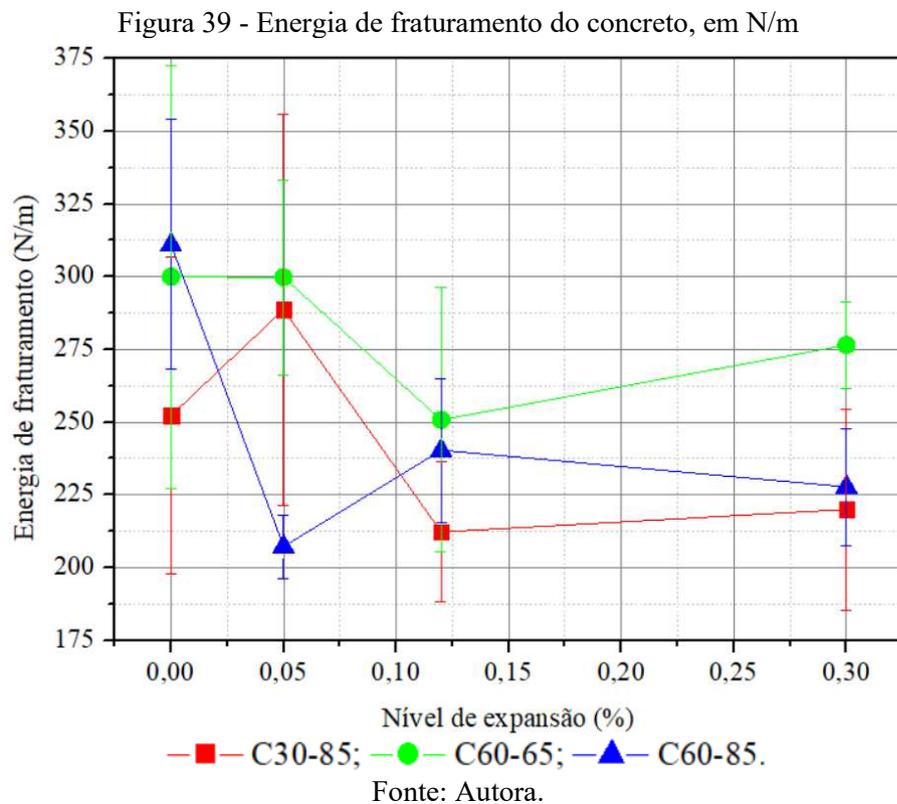
Na Tabela 16 e na Figura 39 estão apresentados os valores médios e desvio padrão da energia de fraturamento dos grupos estudados. É possível observar que entre os níveis 0 e 0,3% houve uma queda de 12,80% no grupo C30-85 e de 26,80% no grupo C60-85, enquanto no grupo C60-

65 a queda foi de apenas 7,83%. Isso demonstra que a temperatura máxima de cura teve um efeito negativo nesta propriedade.

Tabela 16 - Energia de fraturamento do concreto, em N/m.

Traço e tratamento térmico	Nível de expansão (%)			
	0,00	0,05	0,12	0,30
C30-85	252,26 ± 54,52	288,65 ± 67,20	212,22 ± 24,02	219,97 ± 34,61
C60-65	299,96 ± 72,74	299,82 ± 33,49	250,78 ± 45,43	276,46 ± 14,99
C60-85	311,06 ± 42,91	207,25 ± 10,91	240,30 ± 24,68	227,73 ± 20,12

Fonte: Autora.



Quanto ao consumo de cimento, a energia de fraturamento apresentou valores menores para o traço de 30 MPa em relação ao traço de 60 MPa, para os dois tipos de tratamento térmico. Isso provavelmente se deve ao caminho percorrido pela fissura, visto que para 30 MPa o caminho geralmente é pela zona de transição agregado/pasta (menor energia para fraturar), representado pela Figura 40 e para 60 MPa o caminho costuma ser através do agregado (maior energia para fraturar), representado pela Figura 41.

A energia de fraturamento apresentou diferença significativa no ANOVA apenas no grupo C60-85 e entre os níveis 0 e 0,05%, 0 e 0,12% e 0 e 0,3% pelo teste de Tukey. A significância estatística dos resultados pode ter sido influenciada pelas razões já discutidas anteriormente,

mas este ensaio apresenta potencial para contribuir com a avaliação dos concretos com formação de etringita tardia.

Figura 40 - Ruptura na zona de transição agregado/pasta, concreto C30-85.



Fonte: Autora.

Figura 41 - Ruptura através do agregado, concreto C60-85.

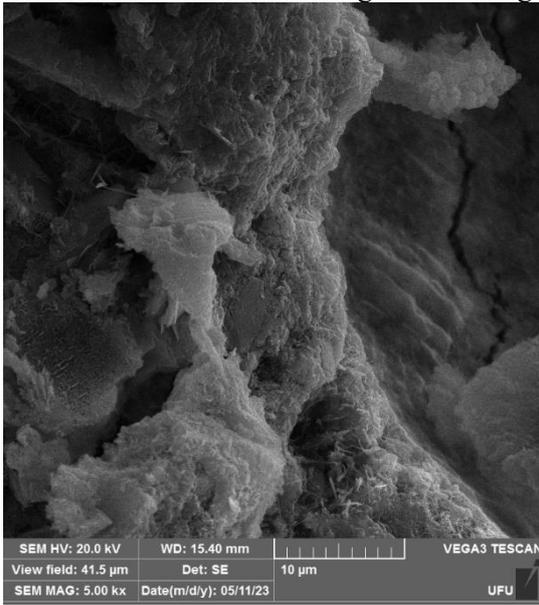


Fonte: Autora.

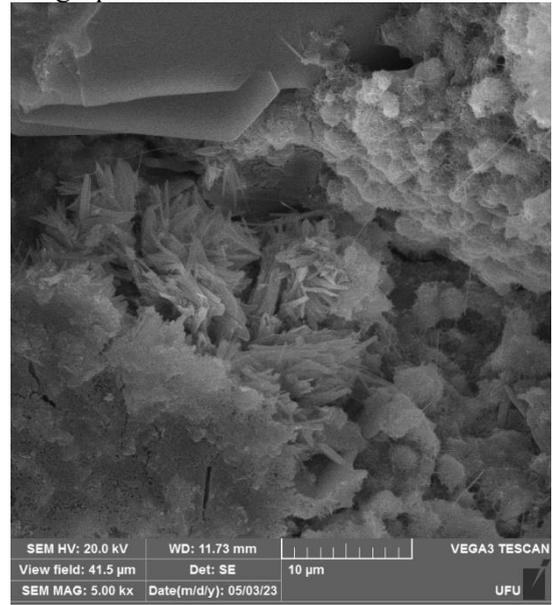
5.7 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

Com o intuito de verificar a formação de etringita tardia no concreto, foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) em amostras de todos os grupos e níveis de expansão. Para o nível 0% de expansão, foram observados somente poros vazios e matriz cimentícia íntegra. Em todos os demais níveis foram identificadas formações aciculares nos poros, matriz cimentícia e zona de transição agregado/pasta com diferentes tamanhos e graus de preenchimento dos poros. Nas Figuras 42, 43 e 44 estão apresentadas as imagens (na mesma escala) dos grupos C30-85, C60-65 e C60-85, nesta ordem.

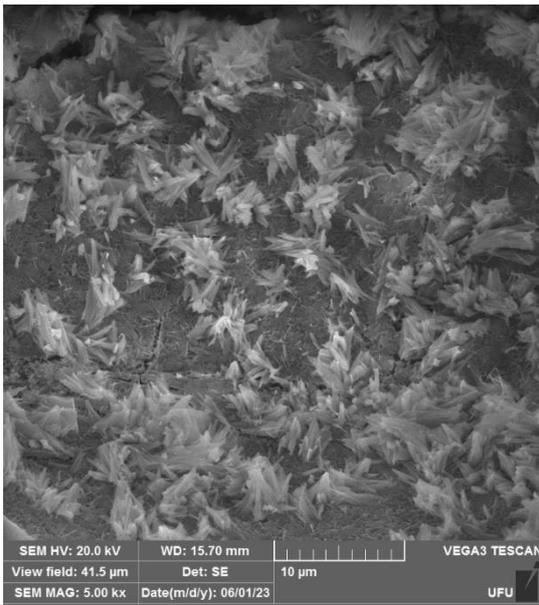
Figura 42 - Imagens de MEV do grupo C30-85



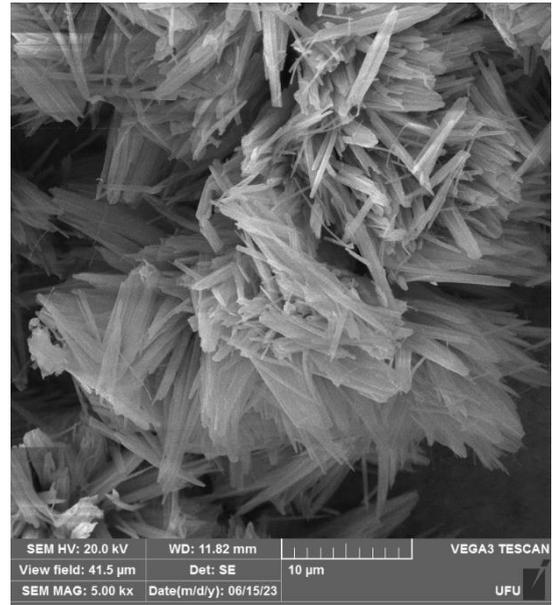
a) 0,0%



b) 0,05%



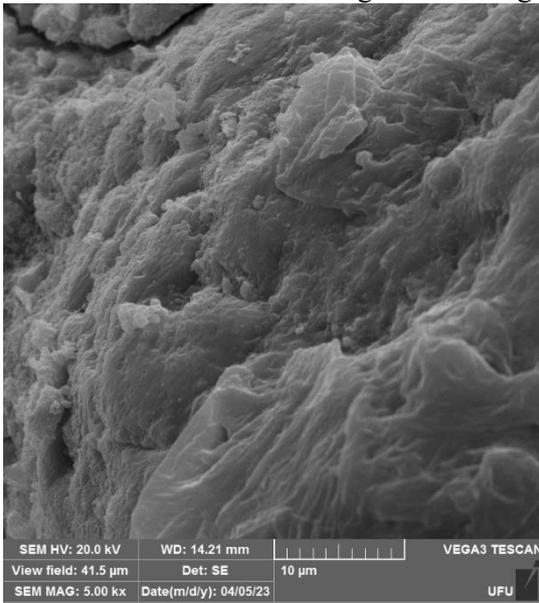
c) 0,12%



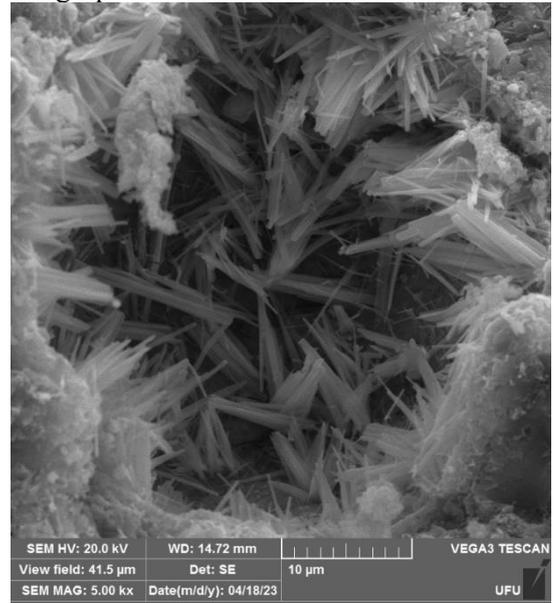
d) 0,30%

Fonte: Autora.

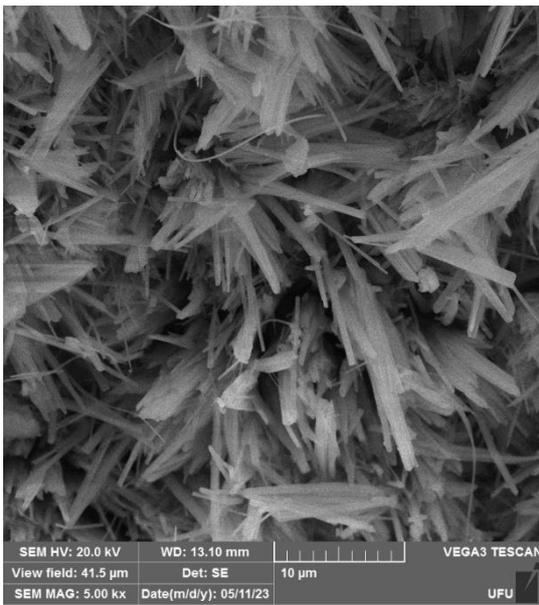
Figura 43 - Imagens de MEV do grupo C60-65



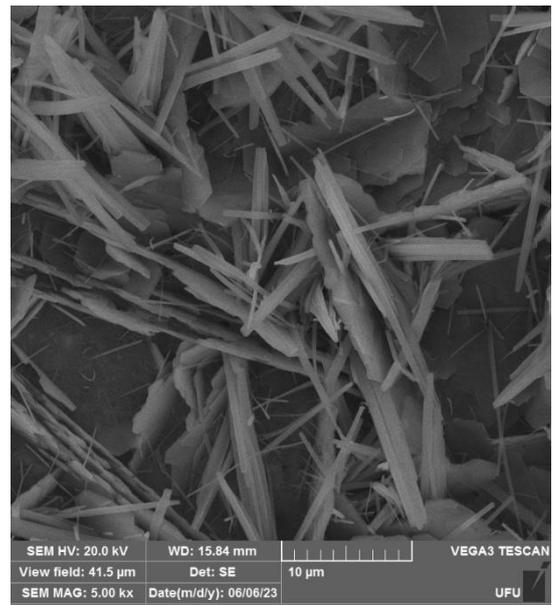
a) 0,0%



b) 0,05%



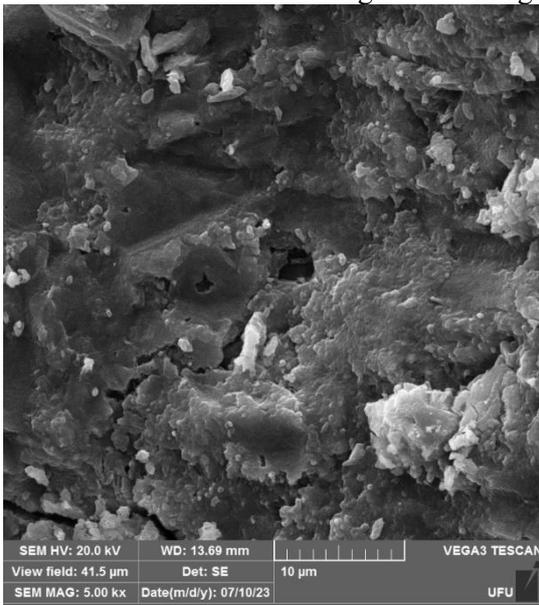
c) 0,12%



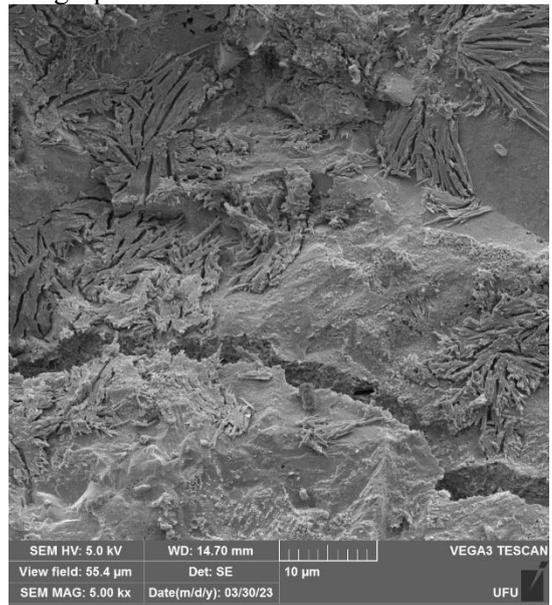
d) 0,30%

Fonte: Autora.

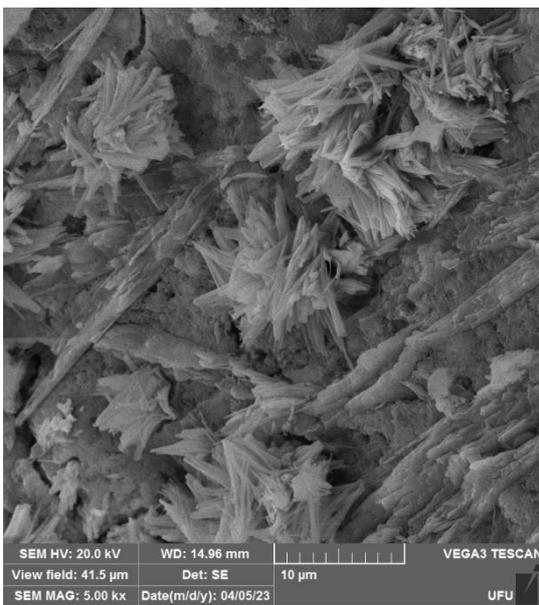
Figura 44 - Imagens de MEV do grupo C60-85



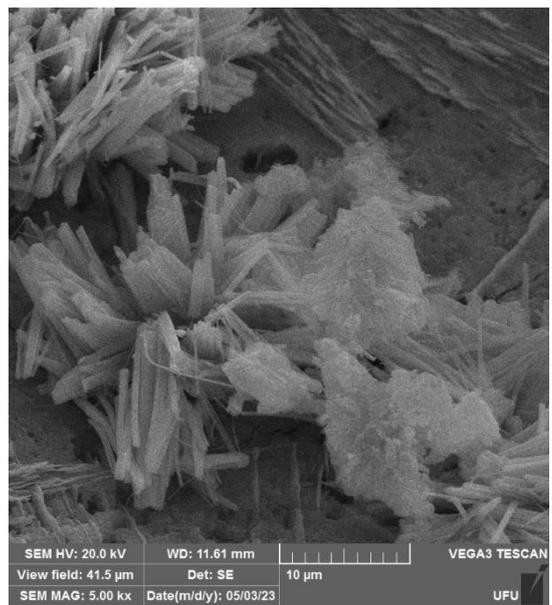
a) 0,0%



b) 0,05%



c) 0,12%

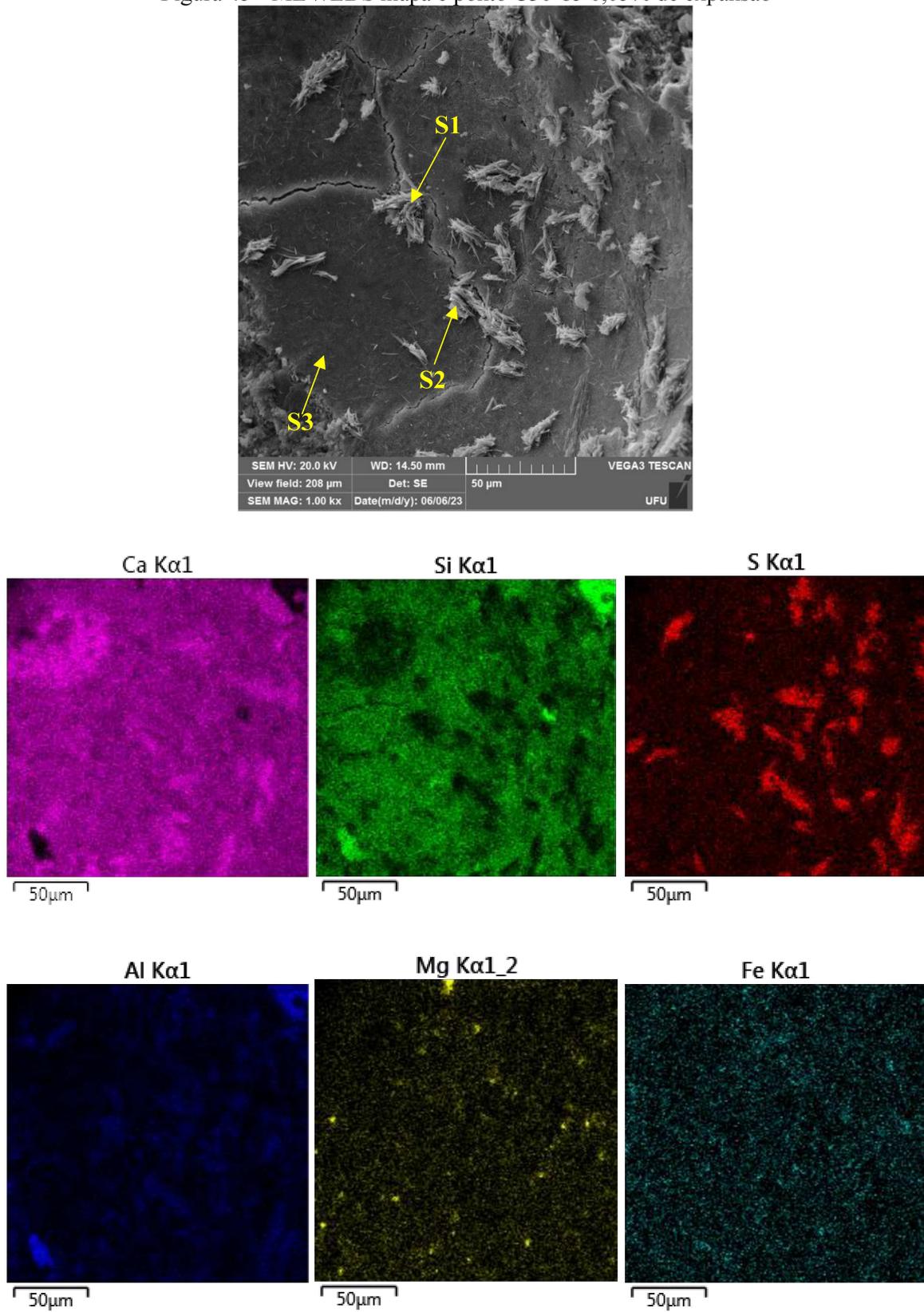


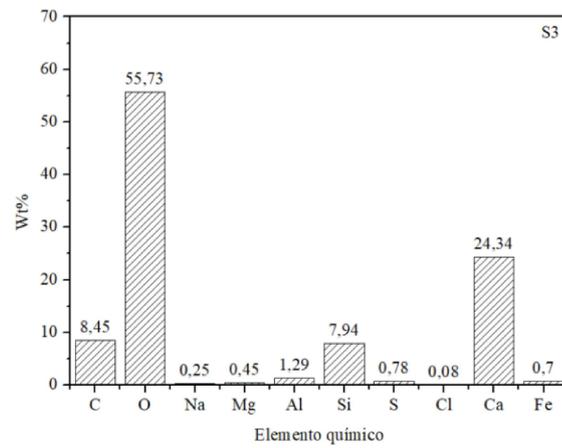
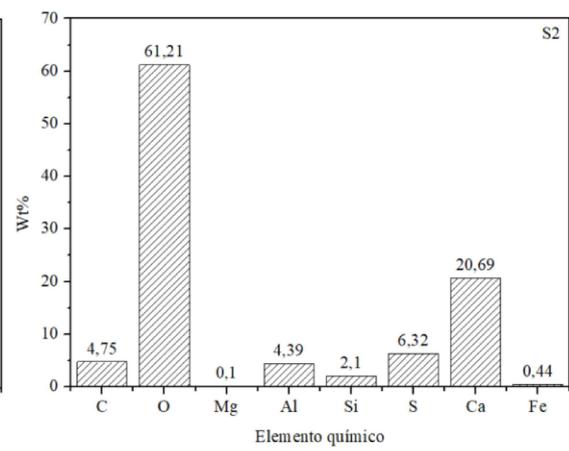
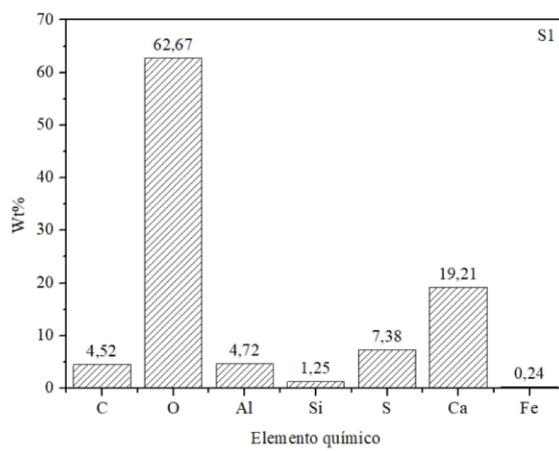
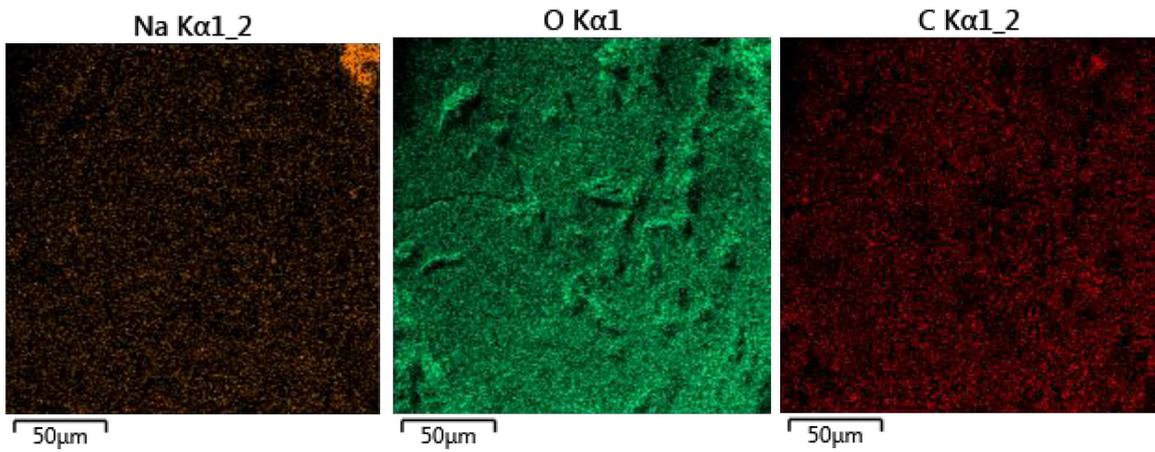
d) 0,30%

Fonte: Autora.

Nas Figuras 45, 46 e 47 estão apresentados a composição química obtida por EDS em alguns pontos de interesse. Foram feitas análises por mapa e por ponto. É possível observar que nos locais onde se encontram as formações aciculares são também os locais com maior concentração de enxofre e alumínio em relação às áreas adjacentes. Isso indica que essas formações são etringita tardia.

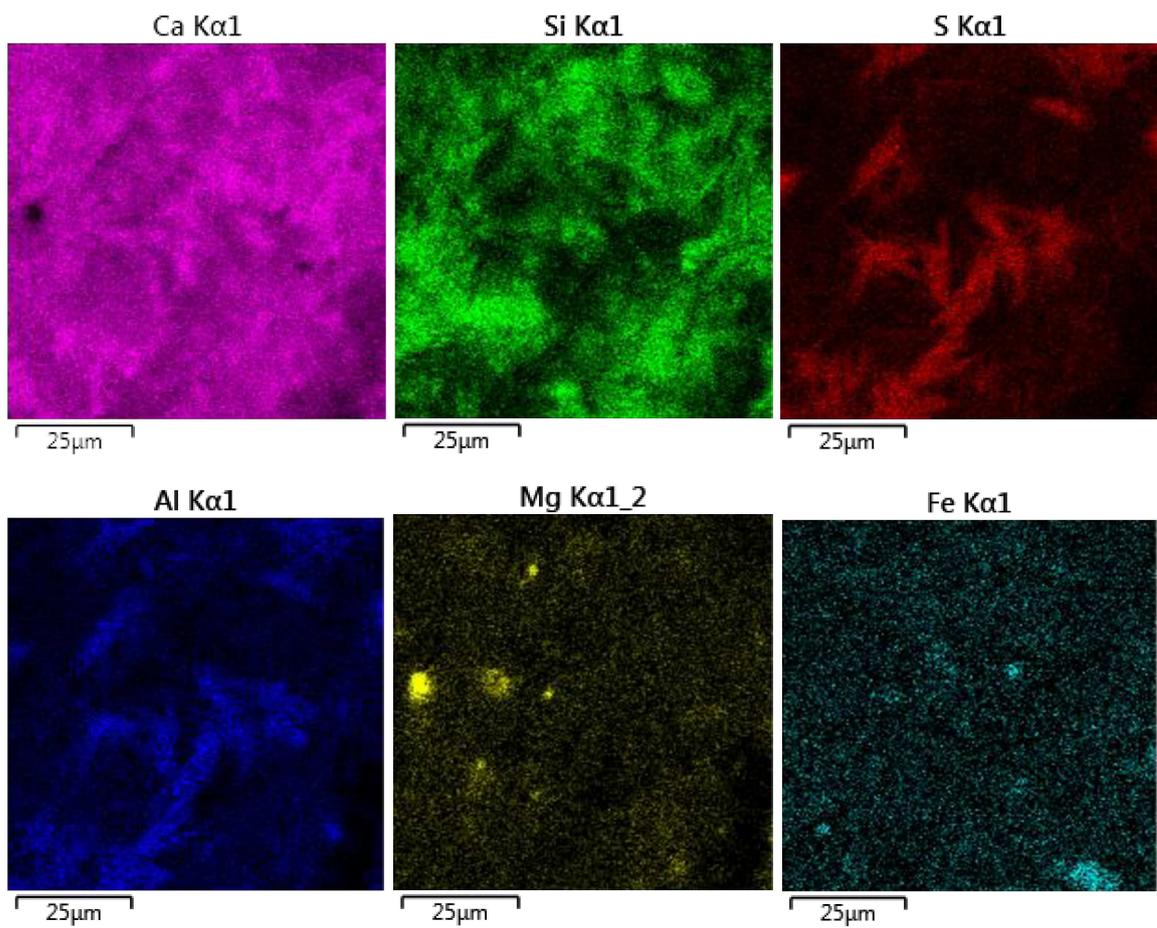
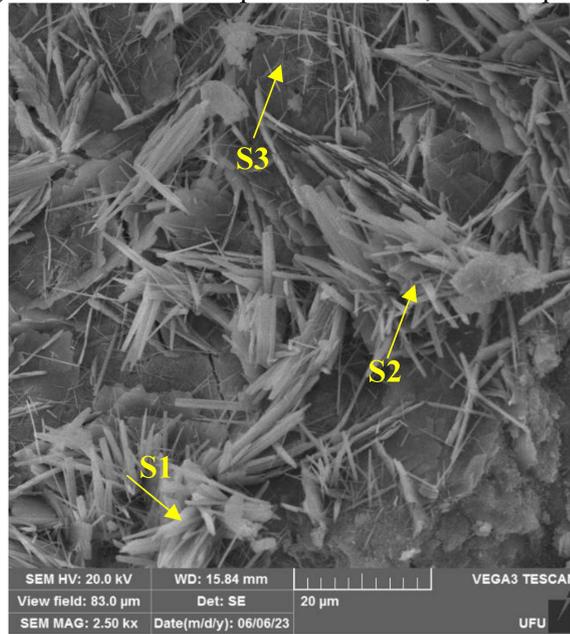
Figura 45 - MEV/EDS mapa e ponto C30-85 0,05% de expansão

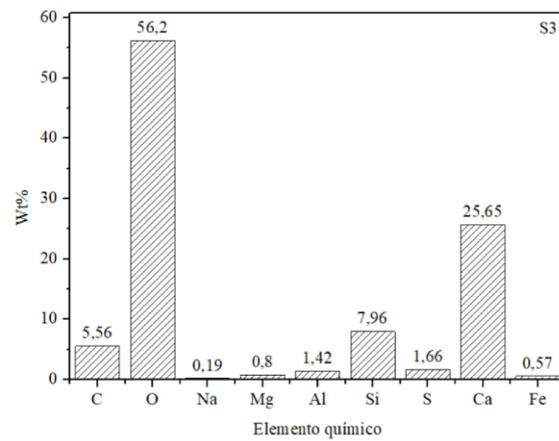
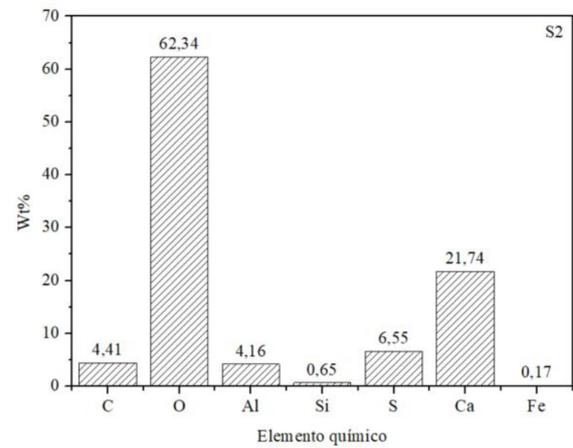
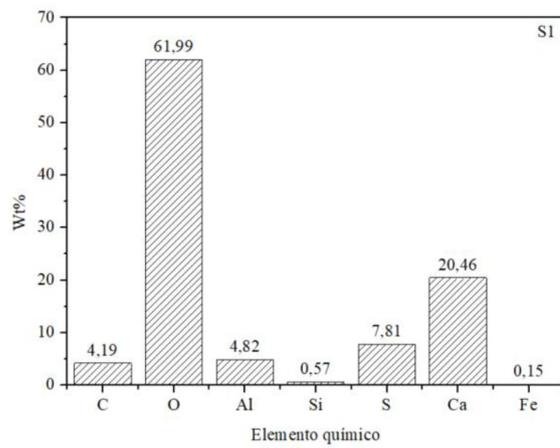
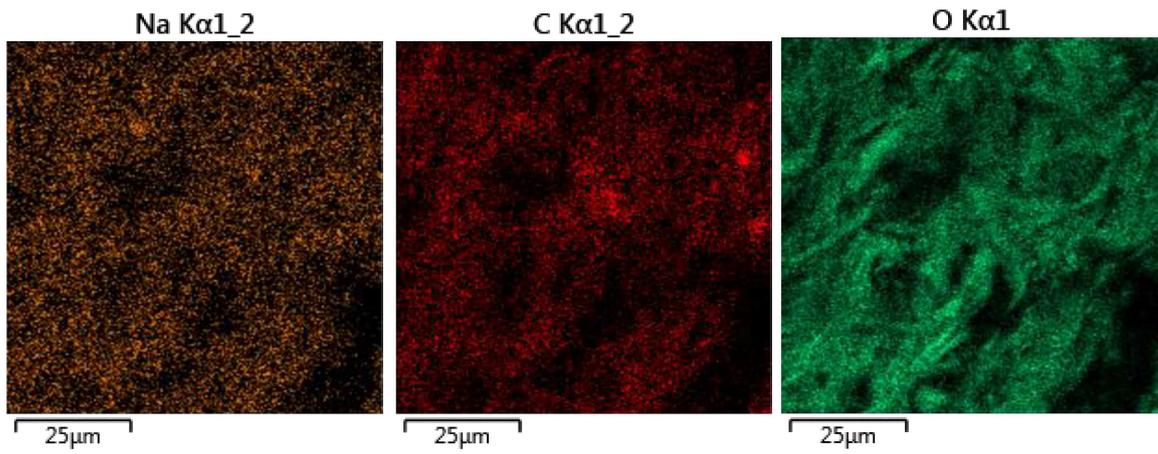




Fonte: Autora.

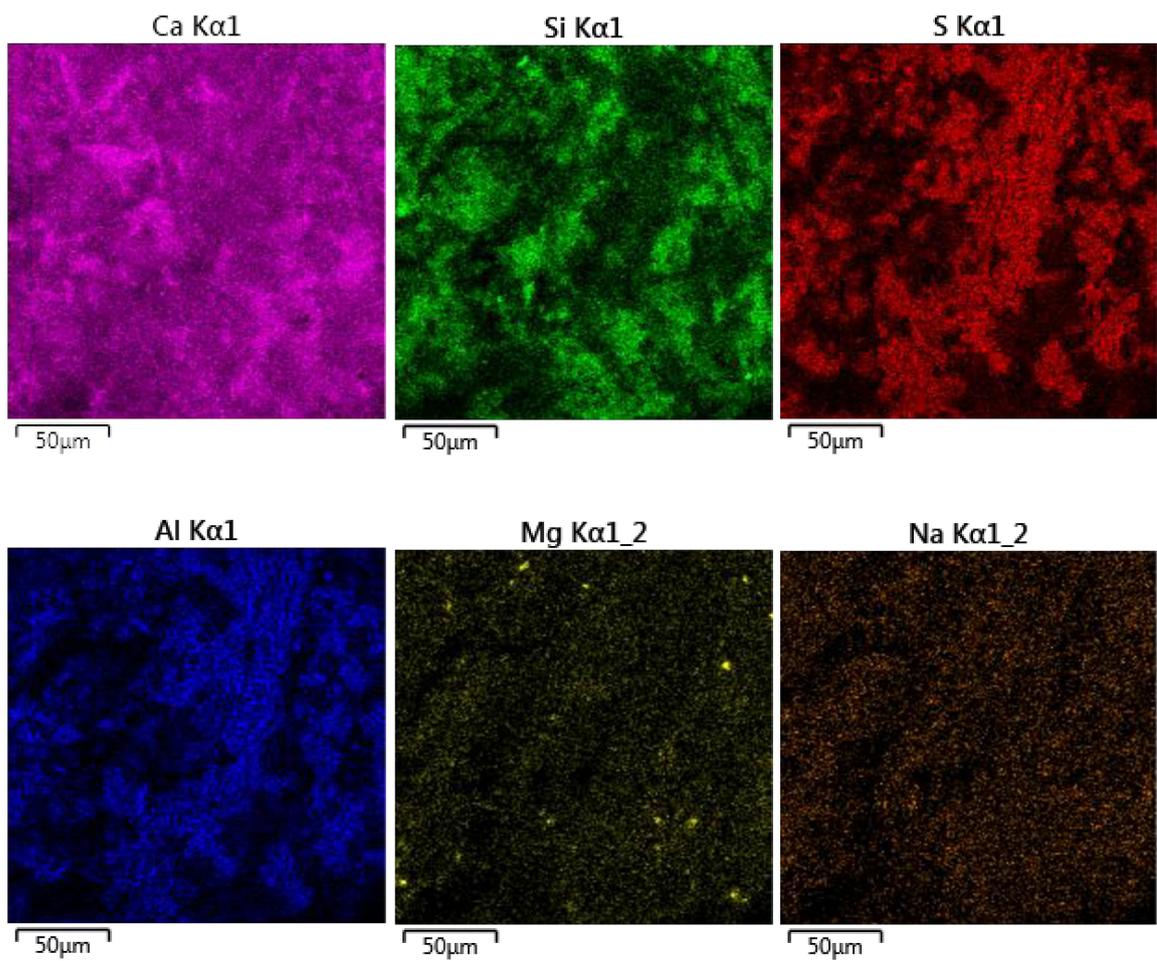
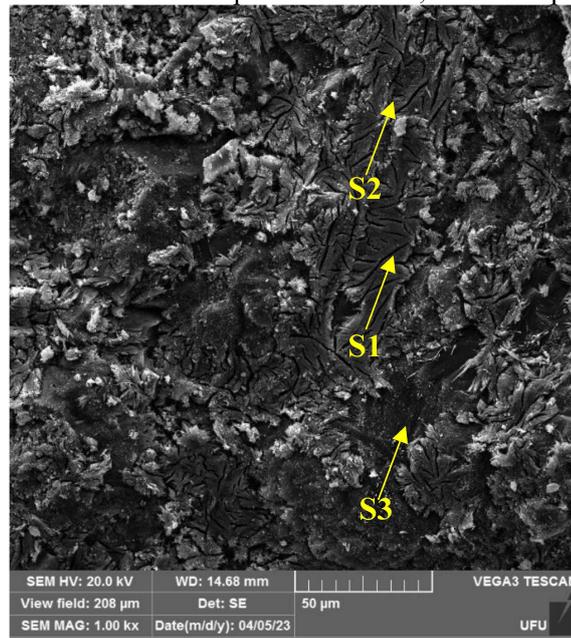
Figura 46 - MEV/EDS ponto C60-65 0,3% de expansão

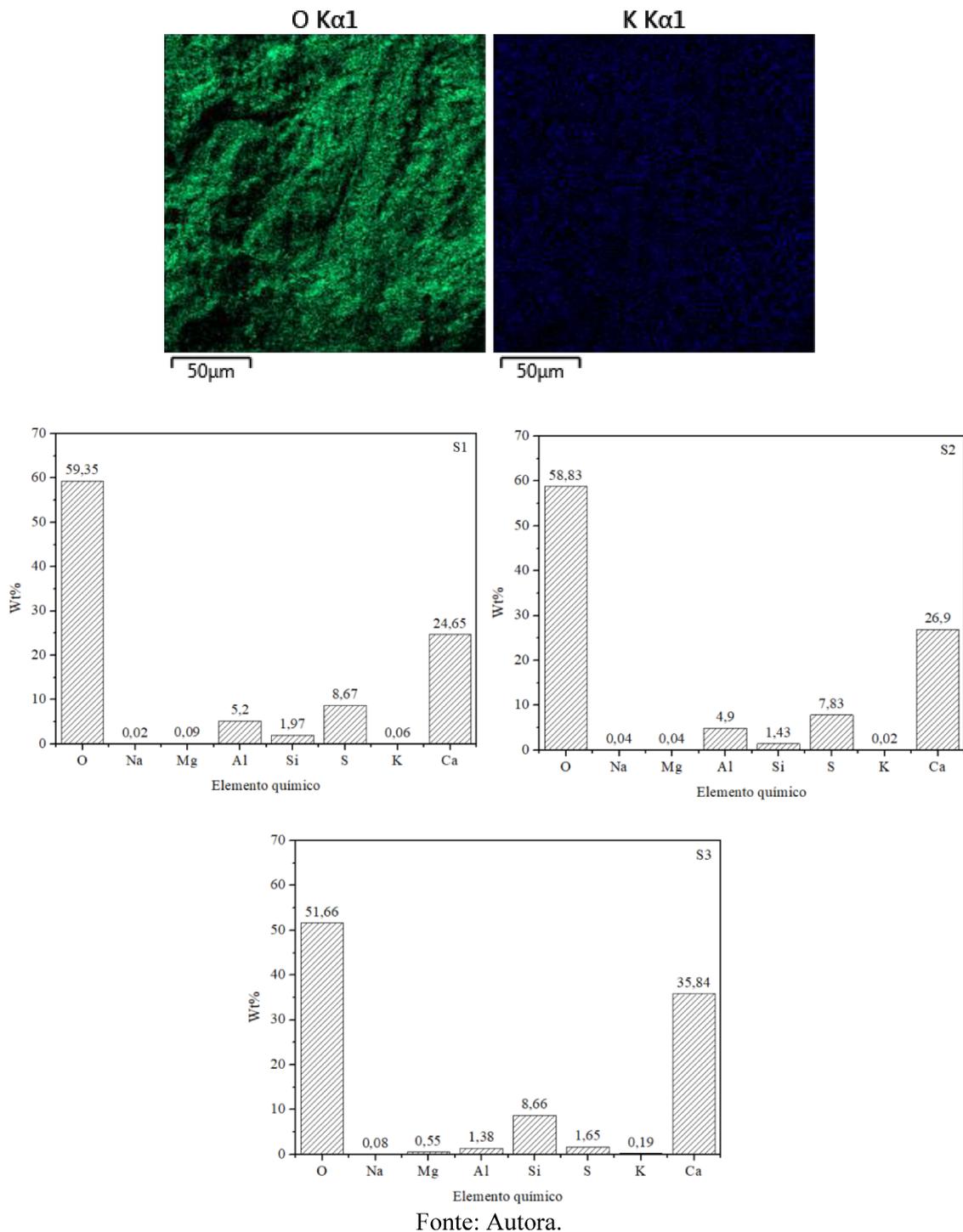




Fonte: Autora.

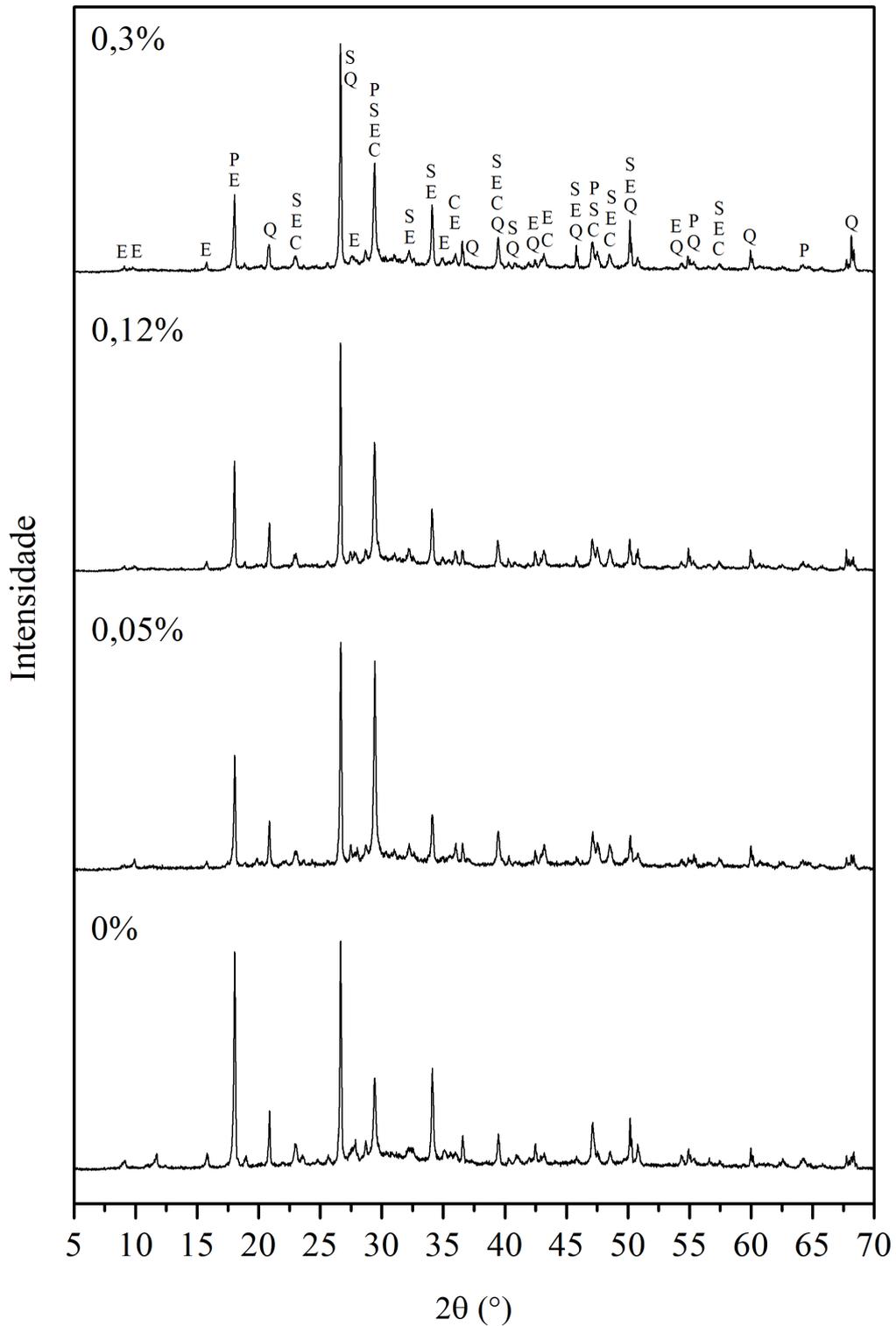
Figura 47 - MEV/EDS ponto C60-85 0,12% de expansão





Através da análise por difração de raios-X (DRX) das amostras em pó, foi possível identificar qualitativamente as fases hidratadas do cimento, minerais dos agregados e possíveis picos de etringita. É importante salientar que pode ter ocorrido sobreposição de picos dos compostos da pasta e dos minerais cristalinos dos agregados. Nas Figuras 48, 49 e 50 estão apresentados os resultados da análise com a identificação dos compostos dos grupos C30-85, C60-65, C60-85, nesta ordem.

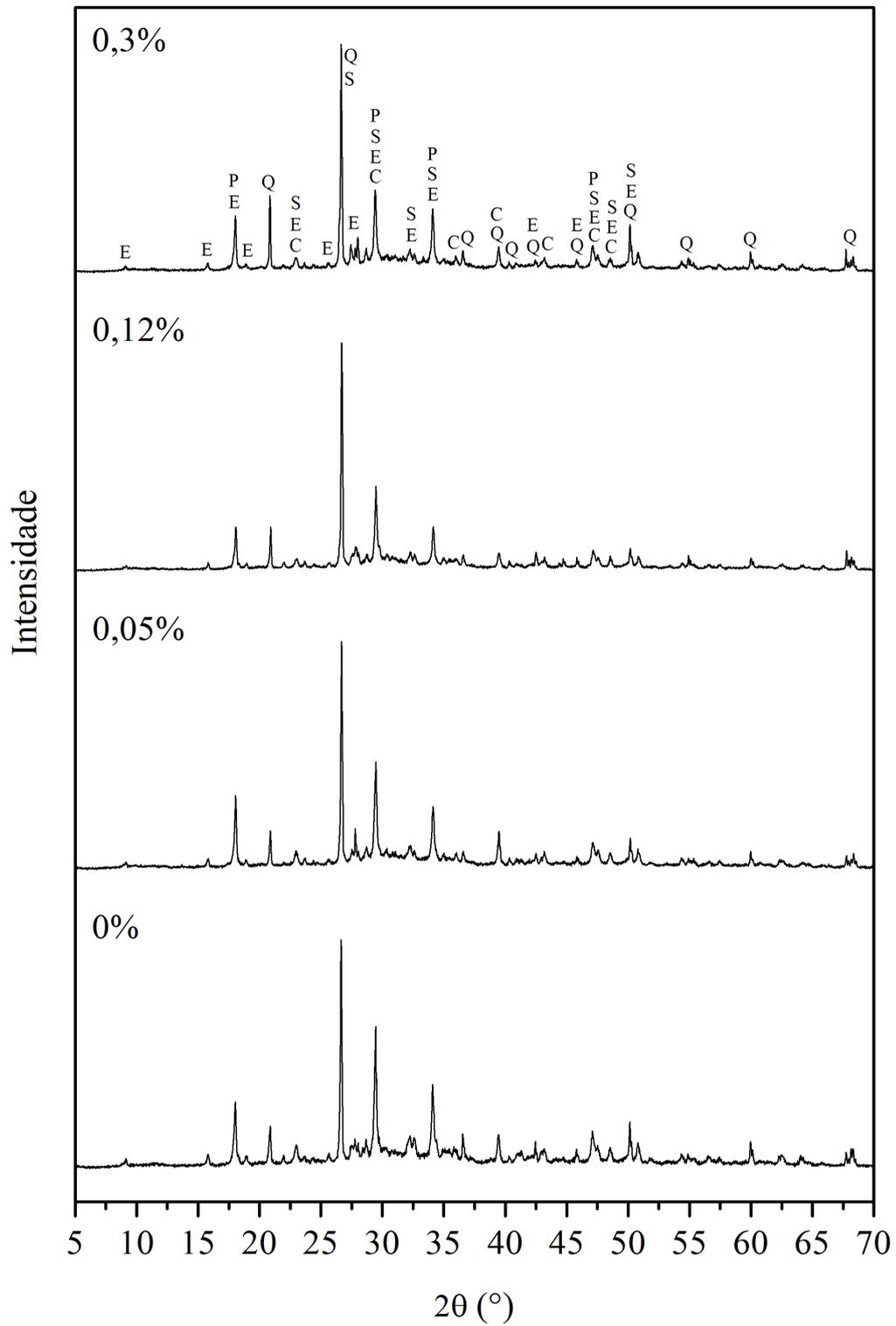
Figura 48 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C30-85



Q - Quartzo (SiO_2); C - Calcita (CaCO_3); P - Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); E - Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$); S - Silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$)

Fonte: Autora.

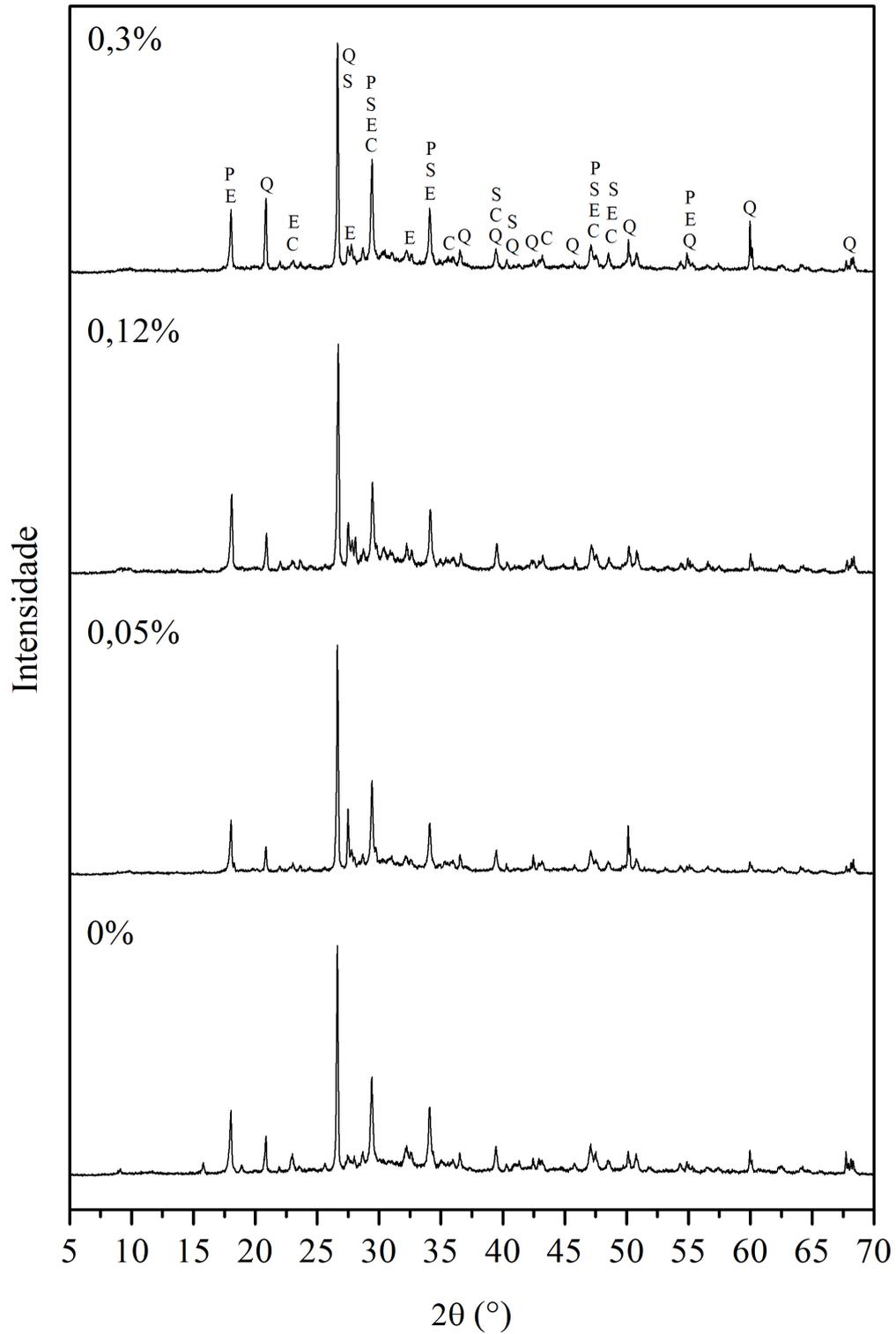
Figura 49 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C60-65



Q - Quartzo (SiO_2); C - Calcita (CaCO_3); P - Portlandita (Ca(OH)_2); E - Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$); S - Silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$)

Fonte: Autora.

Figura 50 - Padrões de DRX das principais fases encontradas no grupo C60-85



Q - Quartzo (SiO_2); C - Calcita (CaCO_3); P - Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); E - Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$); S - Silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$)

Fonte: Autora.

Pode-se observar que os picos de etringita se mostraram mais suaves que os demais, indicando que para esta análise ser efetiva é necessária uma quantidade maior do composto no concreto. Mas, em conjunto com a análise por MEV/EDS, foi possível confirmar a presença de etringita tardia no material.

Na TABELA estão apresentados o símbolo, o nome dos compostos, a composição química e o código ICSD da ficha utilizada para a identificação dos picos característicos.

Tabela 17 - Compostos identificados.

Símbolo	Nome	Composição química	Código ICSD
C	Calcita	CaCO_3	16710
E	Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	16045
P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	53989
Q	Quartzo	SiO_2	174
S	Silicato de cálcio hidratado	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$	80127

Fonte: Autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos por esta pesquisa, foi possível observar que temperaturas de 65 °C, considerada como limiar para o início da dissolução, foi suficiente para provocar a formação de etringita tardia.

O consumo de cimento do concreto também apresentou influência na velocidade da reação. No concreto com o maior consumo, aliado à temperatura de 85 °C, observou-se expansões de 0,3% em cerca de 90 dias após a moldagem e tratamento térmico. Possivelmente esse fator também contribuiu para o ganho de resistência à compressão, conseqüente da hidratação contínua após os 28 dias, o que pode ter mascarado o dano que a DEF deveria ter provocado.

Os ensaios mecânicos apresentaram ganho nas propriedades devido ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia pela etringita tardia e pelos produtos hidratados do cimento nos níveis mais baixos de expansão. Esse preenchimento provavelmente levou a um aumento do módulo dinâmico obtido por ultrassom e um ganho de resistência à compressão.

O ensaio de energia de fraturamento mostrou sensibilidade às expansões, pela queda desta propriedade mecânica. Foi possível observar que o tratamento térmico de 85 °C apresentou maior queda entre os níveis 0 e 0,3% de expansão em relação ao tratamento de 65 °C. Também foi possível notar valores menores para o traço de 30 MPa em relação ao traço de 60 MPa, visto que em 30 MPa a fratura ocorre pela zona de transição agregado/pasta e em 60 MPa ela ocorre através no agregado, demandando maior energia.

Para pesquisas futuras sugere-se o estudo da energia de fraturamento em níveis maiores de expansão, associado aos demais ensaios mecânicos. Além disso, também seria importante avaliar em pesquisas futuras o desempenho de outros cimentos brasileiros quanto a DEF e a influência de diferentes adições para mitigar a reação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a. 9p.

ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019a. 9p.

ABNT. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019b. 12 p.

ABNT. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

ABNT. NBR 8522: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Partes 1 e 2. Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT. NBR 9917: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2022a. 12p.

ABNT. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013. 4p.

ABNT. NBR 12006: Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant. Rio de Janeiro, 1990. 12 p.

ABNT. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022b. 22p.

ABNT. NBR 13583: Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014. 14 p.

ABNT. NBR 14656: Cimento Portland e matérias primas – Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 6p.

ABNT. NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado, partes 1 a 7. Rio de Janeiro, 2018b.

ABNT. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4p.

ABNT. NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018c. 8p.

ABNT. NBR 16697: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018d. 12 p.

ABNT. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b. 7p.

ABNT. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021c. 6p.

ABNT. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021d. 6p.

ABNT. NBR 16973: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021e. 3p.

ABNT. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022c. 5p.

AL SHAMAA, M.; LAVAUD, S.; DIVET, L.; NAHAS, G.; TORRENTI, J. M. Influence of relative humidity on delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 14–22, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.013>>.

ALAM, S. Y.; ZHU, R.; LOUKILI, A. A new way to analyse the size effect in quasi-brittle materials by scaling the heterogeneity size. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 225, n. December 2019, p. 106864, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106864>>.

ALHASSAN, M.; BETOUSH, N.; AL-HUTHAIFI, N.; AL DALOU, A. Estimation of the fracture parameters of macro fiber-reinforced concrete based on nonlinear elastic fracture mechanics simulations. **Results in Engineering**, v. 15, n. May, p. 100539, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100539>>.

AMRAN, Y. H.; SOTO, M. G.; ALYOUSEF, R.; EL-ZEADANI, M.; ALABDULJABBAR, H.; AUNE, V. Performance investigation of high-proportion Saudi-fly-ash-based concrete. **Results in Engineering**, v. 6, n. February, p. 100118, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100118>>.

ANDRADE NETO, J. da S.; DE LA TORRE, A. G.; KIRCHHEIM, A. P. Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. **Construction and Building Materials**, v. 279, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106686>>

ARDALANY, M.; DEAM, B.; FRAGIACOMO, M. Experimental results of fracture energy and fracture toughness of Radiata Pine laminated veneer lumber (LVL) in mode I (opening). **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 8, p. 1189–1205, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9826-1>>

ASTM. C29/C29M: Standard test method for Bulk Density (“Unit Weight”) and voids in aggregate. West Conshohocken: ASTM International, 2016a.

ASTM. C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM. C114: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken: ASTM International, 2022a.

ASTM. C117: Standard test method for materials finer than 75- μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing. West Conshohocken: ASTM International, 2017a.

ASTM. C127: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM. C128: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. West Conshohocken: ASTM International, 2022b.

ASTM. C136/C136M: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM. C187: Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. West Conshohocken: ASTM International, 2016b.

ASTM. C188: Standard test method for density of hydraulic cement. West Conshohocken: ASTM International, 2017b.

ASTM. C204: Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

ASTM. C469/C469M: Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken: ASTM International, 2022c.

ASTM. C496/C496M: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2017c.

BAJI, H.; YANG, W.; LI, C. Q.; SHI, W. Analytical models for effective hydraulic sorptivity, diffusivity and conductivity of concrete with interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 555–568, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.166>>.

BOUALI, A.; GRAIRIA, S.; NETTOUR, D.; CHRAIT, Y.; ARABI, N.; MONTAGNE, A.; IOST, A.; CHICOT, D. Instrumented indentation based methods to assess fracture toughness and type of concrete . Highlights : **Engineering Fracture Mechanics**, p. 108796, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108796>>.

BOURCHY; LAURY BARNES-DAVIN; LAETITIA BESSETTE; JEAN MICHEL TORRENTI. Effect of cement composition on fresh state and heat of hydration of portland cement with limestone and slag. **ACI Materials Journal**, v. 117, n. 1, p. 153–165, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.14359/51719079>>

BRAGANÇA, M. O. G. P.; HASPARYK, N. P.; BRONHOLO, J. L.; SILVA, A. S.; PORTELLA, K. F.; KUPERMAN, S. C. Electrochemical impedance spectroscopy and ultrasound for monitoring expansive reactions and their interactions on cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 305, n. September, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124726>>

BRUNETAUD, X.; LINDER, R.; DIVET, L.; DURAGRIN, D.; DAMIDOT, D. Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite

formation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 40, n. 6, p. 567–578, 2007. Disponível em: <[https://doi.org/ 10.1617/s11527-006-9163-3](https://doi.org/10.1617/s11527-006-9163-3)>

CAI, Y.; XUAN, D.; POON, C. S. Effects of nano-SiO₂ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 295–302, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.186>>.

CAMPOS, A.; LÓPEZ, C. M.; BLANCO, A.; AGUADO, A. Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 668–683, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.180>>.

CAPRARO, A. P. B.; MACIOSKI, G.; DE MEDEIROS, M. H. F. Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete. **Engineering Failure Analysis**, v. 120, n. August 2020, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105116>>

CARPINTERI, A.; FORTESE, G.; RONCHEI, C.; SCORZA, D.; VANTADORI, S. Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 91, p. 66–75, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.03.015>>.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4- 5 SPEC, p. 401–407, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/ 10.1016/S0958-9465\(02\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00080-X)>

CUSTÓDIO, J.; RIBEIRO, A. B. Evaluation of damage in concrete from structures affected by internal swelling reactions - A case study. **Procedia Structural Integrity**, v. 17, p. 80–89, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.012>>.

DABBAGHI, F.; FALLAHNEJAD, H.; NASROLLAHPOUR, S.; DEHESTANI, M.; YOUSEFPOUR, H. Evaluation of fracture energy, toughness, brittleness, and fracture process zone properties for lightweight concrete exposed to high temperatures. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 116, n. May, p. 103088, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103088>>.

DE GRAZIA, M. T.; GOSHAYESHI, N.; GORGA, R.; SANCHEZ, L. F. M.; SANTOS, A. C.; SOUZA, D. J. Comprehensive semi-empirical approach to describe alkali aggregate reaction (AAR) induced expansion in the laboratory. **Journal of Building Engineering**, v. 40, n. December 2020, 2021. Disponível em: <[https://doi.org/ 10.1016/j.jobee.2021.102298](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102298)>

DESCHENES, R. A.; GIANNINI, E. R.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; HALE, W. M. Effects of moisture, temperature, and freezing and thawing on Alkali-Silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 4, p. 575–584, 2018. Disponível em: <[https://doi.org/ 10.14359/5170219](https://doi.org/10.14359/5170219)>

DOBROVOLSKI, M. E. G.; MUNHOZ, G. S.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Effect of crystalline admixture and polypropylene microfiber on the internal sulfate attack in Portland cement composites due to pyrite oxidation. **Construction and Building Materials**, v. 308, n. September, p. 125018, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125018>>.

DORN, T.; BLASK, O.; STEPHAN, D. Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 323, n. November 2021, p. 126554, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126554>>.

DOUGLAS HOOTON, R. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. August, p. 105827, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105827>>.

DUCHESNE, J.; RODRIGUES, A.; FOURNIER, B. Concrete damage due to oxidation of sulfide-bearing aggregate: A review of recent advances and limitations. **RILEM Technical Letters**, v. 6, p. 82–92, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.138>>

ELAHI, M. M. A.; SHEARER, C. R.; NASER RASHID REZA, A.; SAHA, A. K.; KHAN, M. N. N.; HOSSAIN, M. M.; SARKER, P. K. Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122628, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>>.

ERDEM, T. K.; TURANLI, L.; ERDOGAN, T. Y. Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 741–745, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01058-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01058-X)>

FERREIRA, L. E. T. **Elementos de Mecânica da Fratura Aplicada à Engenharia Estrutural**: aspectos analíticos, computacionais e experimentais. 2ed. Lavras: Editora UFLA, 2019.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A.; RAJABIPOUR, F. The influence of alkali–silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor. **Cement and Concrete Research**, v. 94, p. 49–58, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.006>>.

GIANNINI, E. R.; SANCHEZ, L. F. M.; TUINUKUAFE, A.; FOLLIARD, K. J. Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 253–264, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.012>>

GU, Y.; MARTIN, R. P.; OMIKRINE METALSSI, O.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 123, n. May, p. 1–11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.011>>.

GU, Y.; OMIKRINE METALSSI, O.; MARTIN, R. P.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. Locating ettringite due to DEF at the pore scale of cement paste by heat-based dissolution tests. **Construction and Building Materials**, v. 258, 2020. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120000>>

GUIRGUIS, B.; SHEHATA, M. H. A new screening test to evaluate the presence of oxidizable sulphide minerals in coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1096–1104, 2017. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.198>>.

GUO, J. J.; WANG, K.; QI, C. G. Determining the mineral admixture and fiber on mechanics and fracture properties of concrete under sulfate attack. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 3, p. 1–15, 2021. Disponível em:<

<https://doi.org/10.3390/jmse9030251>>

HASPARYK, N. P.; SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; KUPERMAN, S. C. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 3, p. 1–19, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300005>>

HAYES, N. W.; GUI, Q.; ABD-ELSSAMD, A.; PAPE, Y. Le; GIORLA, A. B.; PAPE, S. Le; GIANNINI, E. R.; MA, Z. J. Monitoring alkali-silica reaction significance in nuclear concrete structural members. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 16, n. 4, p. 179–189, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3151/jact.16.179>>

HU, S.; YIN, Y. Fracture properties of concrete under freeze–thaw cycles and sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 350, n. May, p. 128856, 2022. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128856>>.

IFSTTAR. **Recomendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation**. Marne-la-Valle: IFSTTAR, 2018. Technics and methods, GTI5-A, 70 p.

JEBLI, M.; JAMIN, F.; PELISSOU, C.; LHOPITAL, E.; YOUSOUFI, M. S. E. Characterization of the expansion due to the delayed ettringite formation at the cement paste-aggregate interface. **Construction and Building Materials**, v. 289, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122979>>

JIA, M.; WU, Z.; HAN, X.; CHEN, H.; YU, R. C. Experimental investigation and modified calculation model of critical crack propagation length of concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 121, n. August, p. 103561, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103561>>.

JOSHI, N. R.; MATSUMOTO, A.; ASAMOTO, S.; MIURA, T.; KAWABATA, Y. Investigation of the mechanical behaviour of concrete with severe delayed ettringite formation expansion focusing on internal damage propagation under various compressive loading patterns. **Cement and Concrete Composites**, v. 128, n. February, p. 104433, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104433>>.

KAWABATA, Y.; TAKAHASHI, H.; WATANABE, S. The long-term suppression effects of fly ash and slag on the expansion of heat-cured mortar due to delayed ettringite formation. **Construction and Building Materials**, v. 310, n. September, p. 125235, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125235>>.

KAWABATA, Y.; UEDA, N.; MIURA, T.; MULTON, S. The influence of restraint on the expansion of concrete due to delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, n. April, p. 23–26, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104062>>

KCHAKECH, B.; MARTIN, R. P.; METALSSI, O. O.; TOUTLEMONDE, F. Experimental Study of the Influence of the Temperature and Duration of Heat Treatments at an Early Age on the Risk of Concrete Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation. **CONCREEP 2015: Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures - Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structure**, n. November, p. 455–465, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1061/9780784479346.055>>

KHALILPOUR, S.; BANIASAD, E.; DEHESTANI, M. A review on concrete fracture energy and effective parameters. **Cement and Concrete Research**, v. 120, n. September 2018, p. 294–321, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.013>>.

KOTHARI, C.; TAKAHASHI, Y. The effect of heat treatment on the kinetics of the delayed ettringite formation – An improved chemo-thermal-hygral model. **Construction and Building Materials**, v. 331, n. April, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127358>>

LARIVE, C. **Apports combinés de l’experimentation et de la modélisation à la compréhension de l’alcali-réaction et de ses effets mécaniques**. Thèse de doctorat. 335p. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997.

LEKLOU, N.; AUBERT, J. E.; ESCADEILLAS, G. Influence of various parameters on heat-induced internal sulphate attack. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 17, n. 3, p. 141–153, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19648189.2012.755338>>

LI, J.; WU, Z.; SHI, C.; YUAN, Q.; ZHANG, Z. Durability of ultra-high performance concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119296, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>>.

LI, W.; DENG, M.; MO, L.; PANESAR, D. K.; MAO, Z. Alkali carbonate reaction (ACR): Investigations on mechanism of dedolomitization of dolomite in dolostones. **Construction and Building Materials**, v. 351, n. August, p. 128942, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128942>>.

LU, C.; BU, S.; ZHENG, Y.; KOSA, K. Deterioration of concrete mechanical properties and fracture of steel bars caused by alkali-silica reaction: A review. **Structures**, v. 35, n. May 2021, p. 893–902, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.051>>.

LUO, D.; SINHA, A.; ADHIKARI, M.; WEI, J. Mitigating alkali-silica reaction through metakaolin-based internal conditioning: New insights into property evolution and mitigation mechanism. **Cement and Concrete Research**, v. 159, n. June, p. 106888, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106888>>.

MARCELINO, A. P.; CALIXTO, J. M.; GUMIERI, A. G.; CALDEIRA, C. L.; DELBEM, I. D.; FERREIRA, M. C. A feasible evaluation protocol to determine the most reactive sulfide-bearing aggregate for use in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118031, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118031>>.

MARTIN, R. P.; SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; TOUTLEMONDE, F. Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 956–964, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.047>>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. J. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON, 3ed, 2014.

MIARKA, P.; PAN, L.; BÍLEK, V.; SEITL, S.; CIFUENTÉS, H. Influence of the chevron notch type on the values of fracture energy evaluated on alkali-activated concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 236, n. February, p. 107209, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107209>>.

MILANESI, C. A.; MARFIL, S. A.; LOCATI, F. Expansive behavior of an alkali-carbonate reactive dolostone from Argentina: Proposal of an osmotic theory-based model to explain the expansion caused by the alkali attack. **Cement and Concrete Research**, v. 138, n. October, p. 106239, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106239>>.

MILANESI, C. A.; MARFIL, S. A.; LOCATI, F.; BENITO, D. Effects of different alkaline solutions on the expansivity of rock prisms of an alkali-reactive dolostone from Valcheta (Río Negro, Argentina). **Cement and Concrete Research**, v. 134, n. December 2019, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106092>>

MIURA, T.; NAKAMURA, H.; YAMAMOTO, Y. Impact of origination of expansion on three-dimensional expansion crack propagation process due to DEF evaluated by mesoscale discrete model. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119911, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119911>>.

MIURA, T.; SATO, K.; FUJISHIMA, M.; NAKAMURA, H.; KAWABATA, Y. Mechanism for reduction in compressive properties of cementitious materials in relation to internal crack patterns due to ASR and DEF expansion. **Cement and Concrete Composites**, v. 128, n. February, p. 104441, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104441>>.

MOHAMMADI, A.; GHIASVAND, E.; NILI, M. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119567, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119567>>.

MOHR, B. J.; ISLAM, M. S.; FRANCE-MENSAH, J. Leachate testing for delayed ettringite formation potential in cementitious systems. **Cement**, v. 12, n. February, p. 100060, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100060>>.

NOËL, M.; SANCHEZ, L.; TAWIL, D. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: Review and research needs. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 20, p.

1052–1063, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00383>>

OUVRIER-BUFFET, F.; EIRAS, J. N.; GARNIER, V.; PAYAN, C.; RANAIVOMANANA, N.; DURVILLE, B.; MARQUIE, C. Linear and nonlinear resonant ultrasonic techniques applied to assess delayed ettringite formation on concrete samples. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 121545, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121545>>.

PAUL, A.; RASHIDI, M.; KIM, J. Y.; JACOBS, L. J.; KURTIS, K. E. The impact of sulfate- and sulfide-bearing sand on delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, n. January 2021, p. 104323, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104323>>.

PICHELIN, A.; CARCASSÈS, M.; CASSAGNABÈRE, F.; MULTON, S.; NAHAS, G. Sustainability, transfer and containment properties of concrete subject to delayed ettringite formation (DEF). **Cement and Concrete Composites**, v. 113, n. June, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103738>>

PORTELLA, K.; PAGAN HASPARYK, N.; D'OREY GAIVÃO PORTELLA BRAGANÇA, M.; LUÍS BRONHOLO, J.; GOMES DIAS, B.; EVANGELISTA LAGOEIRO, L. Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: Case of study with high early strength Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 311, n. September, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125341>>

RAMU, Y. K.; SIRIVIVATNANON, V.; THOMAS, P.; DHANDAPANI, Y.; VESSALAS, K. Evaluating the impact of curing temperature in delayed ettringite formation using electrochemical impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 282, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122726>>

RIDA, L.; ALAOUI, A. H. Effect of high volume fly ash and curing temperature on delayed ettringite formation. **Materials Today: Proceedings**, v. 58, p. 1285–1293, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.110>>.

SANCHEZ, L. F. M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 107, n. September 2017, p. 284–303, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.017>>

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 20–32, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.071>>.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1178–1188, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.14359/51688983>>

SANGEETHA, S.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, O. G. Effect of steel fibre on fracture

toughness of concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, n. Part 2, p. 1036–1040, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.289>>.

SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S.; LERMEN, R. T. Evaluation of delayed ettringite formation through physical, mechanical, and microstructural assays. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 1, p. 101–109, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.14359/51728282>>

SCRIVENER, K.; OUZIA, A.; JUILLAND, P.; KUNHI MOHAMED, A. Advances in understanding cement hydration mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. August, p. 105823, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105823>>.

SELLIER, A.; MULTON, S. Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 108, n. May 2017, p. 72–86, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.006>>.

SILVA, M. E. de A.; DA SILVA, E. M.; QUARESMA, D. da S.; NUNES, L. M. C.; PASSOS, I. de S.; CORDEIRO, D. R.; CALDAS, Á. M. de J.; OGORODNIK, M. E. A. Patologias no concreto armado em elementos de projetos estruturais: uma revisão / Pathologies in reinforced concrete in elements of structural projects: a review. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 43522–43539, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-067>>

SONG, Y.; DAI, G.; ZHAO, L.; BIAN, Z.; LI, P.; SONG, L. Permeability prediction of hydrated cement paste based on its 3D image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118527, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118527>>.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 683–693, 2001.

TIECHER, F.; LANGOSKI, M.; HASPARYK, N. Behavior of mortars with different types of cement when induced to Delayed Ettringite Formation (DEF). **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 3, p. 1–16, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.537>>

TROTTIER, C.; DE GRAZIA, M. T.; MACEDO, H. F.; SANCHEZ, L. F. M.; DE ANDRADE, G. P.; DE SOUZA, D. J.; NABOKA, O.; FATHIFAZL, G.; NKINAMUBANZI, P. C.; DEMERS, A. Freezing and Thawing Resistance of Fine Recycled Concrete Aggregate (FRCA) Mixtures Designed with Distinct Techniques. **Materials**, v. 15, n. 4, p. 1–23, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma15041342>>

VISHALAKSHI, K. P.; REVATHI, V.; SIVAMURTHY REDDY, S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 194, n. February, p. 52–60, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.029>>.

WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; PINTO DA SILVA FILHO, L. C. From prescriptive to performance-based: An overview of international trends in specifying durable concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 52, n. March, 2022. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104359>>

WANG, X.; SAIFULLAH, H. A.; NISHIKAWA, H.; NAKARAI, K. Effect of water–cement ratio, aggregate type, and curing temperature on the fracture energy of concrete.

Construction and Building Materials, v. 259, p. 119646, 2020. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119646>>.

XIE, C.; CAO, M.; KHAN, M.; YIN, H.; GUAN, J. Review on different testing methods and factors affecting fracture properties of fiber reinforced cementitious composites.

Construction and Building Materials, v. 273, p. 121766, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121766>>.

XIE, J.; LIU, Y.; YAN, M. L.; YAN, J. B. Mode I fracture behaviors of concrete at low temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 323, n. February, p. 126612, 2022.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126612>>.

YAMMINE, A.; HAMDADOU, M.; LEKLOU, N.; BIGNONNET, F.; CHOINSKA-COLOMBEL, M. Effect of recycled concrete aggregates and recycled filler on delayed ettringite formation: An experimental study compared to chemical modelling. **Cement and Concrete Composites**, v. 132, n. June, 2022. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104636>>

YAO, J.; YANG, Y.; CHEN, J. A novel chemo-mechanical model for fracture toughness of mortar under sulfate attack. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 109, n. June, p. 102762, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102762>>.

YIN, Y.; HU, S.; LIAN, J.; LIU, R. Fracture properties of concrete exposed to different sulfate solutions under drying-wetting cycles. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 266, n. March, p. 108406, 2022. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108406>>.

ZAHEDI, A.; TROTTIER, C.; SANCHEZ, L.; NOËL, M. Evaluation of the induced mechanical deterioration of alkali-silica reaction affected concrete under distinct confinement conditions through the Stiffness Damage Test. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, n. February 2021, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104343>>

ZAJAC, M.; WIECZOREK, M.; LOTHENBACH, B.; BULLERJAHN, F.; SCHMIDT, V. M.; BEN HAHA, M. Effect of alkali and sulfate on early hydration of Portland cements at high water to cement ratio. **Construction and Building Materials**, v. 345, n. June, p. 128283, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128283>>.

ZHANG, Y.; PAN, Y.; ZHANG, D. A literature review on delayed ettringite formation: Mechanism, affect factors and suppressing methods. **Magazine of Concrete Research**, v. 73, n. 7, p. 325–342, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00268>>

ZHONG, R.; WILLE, K. Deterioration of residential concrete foundations: The role of pyrrhotite-bearing aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, n. November 2017, p. 53–61, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.012>>.

APÊNDICE A – Valores individuais, média e desvio padrão dos ensaios mecânicos

Tabela A1 - Resistência à compressão aos 7 dias, em MPa.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	23,99	19,35	16,41	18,36
	CP2	18,76	19,51	18,45	19,45
	CP3	23,39	16,32	18,82	20,69
	Média	22,04	18,40	17,89	19,50
	Desvio padrão	2,86	1,80	1,30	1,17
C60-65	CP1	57,88	56,25	61,72	56,77
	CP2	53,57	51,24	56,81	57,76
	CP3	57,47	49,81	57,95	55,28
	Média	56,31	52,43	58,83	56,60
	Desvio padrão	2,38	3,39	2,57	1,25
C60-85	CP1	55,56	48,94	51,47	59,20
	CP2	57,24	51,26	53,15	57,95
	CP3	55,88	50,95	50,48	58,67
	Média	56,23	50,39	51,70	58,61
	Desvio padrão	0,89	1,26	1,35	0,62

Fonte: Autora.

Tabela A2 – Resistência à compressão, em MPa.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	30,00	16,04	18,87	23,63
	CP2	30,17	23,56	26,13	25,16
	CP3	30,55	23,06	23,99	28,91
	CP4		21,24	19,52	
	Média	30,24	20,97	22,13	25,90
	Desvio padrão	0,28	3,44	3,51	2,72
C60-65	CP1	67,36	66,48	71,12	77,21
	CP2	68,84	66,88	79,11	84,61
	CP3	68,05	69,46	76,74	80,09
	Média	68,08	67,61	75,66	80,64
	Desvio padrão	0,74	1,62	4,10	3,73
C60-85	CP1	66,75	61,05	70,28	72,22
	CP2	66,36	64,43	70,19	76,97
	CP3	65,13	61,37	69,04	71,57
	CP4			68,06	68,95
	Média	66,08	62,29	69,39	72,43
	Desvio padrão	0,85	1,87	1,05	3,34

Fonte: Autora.

Tabela A3 – Resistência à tração, em MPa.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	3,60	2,94	3,68	3,10
	CP2	3,17	2,50	2,81	2,93
	CP3	2,61	2,96	3,06	2,62
	Média	3,13	2,80	3,19	2,88
	Desvio padrão	0,50	0,26	0,45	0,24
	C60-65	CP1	5,28	4,23	6,16
CP2		4,84	3,61	5,39	4,10
CP3		5,30	4,39	4,61	4,84
Média		5,13	4,08	5,39	4,65
Desvio padrão		0,27	0,41	0,77	0,49
C60-85		CP1	5,08	5,21	4,31
	CP2	4,63	4,35	4,56	5,10
	CP3	3,90	4,37	4,18	4,35
	Média	4,54	4,64	4,35	4,65
	Desvio padrão	0,59	0,49	0,19	0,40

Fonte: Autora.

Tabela A4 – Módulo de elasticidade estático, em Gpa.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	35,80	30,40	33,70	26,20
	CP2	36,10	29,80	34,20	27,80
	CP3	36,20	30,42	31,50	25,20
	CP4				27,90
	Média	36,03	30,21	33,13	26,78
	Desvio padrão	0,21	0,35	1,44	1,31
C60-65	CP1	44,40	45,10	46,80	40,80
	CP2	46,40	45,00	47,50	44,40
	CP3	46,80	44,80	47,40	47,40
	Média	45,87	44,97	47,23	44,20
	Desvio padrão	1,29	0,15	0,38	3,30
	C60-85	CP1	48,30	43,10	46,70
CP2		45,30	43,70	44,80	43,90
CP3		47,10	41,10	44,70	46,10
Média		46,90	42,63	45,40	45,13
Desvio padrão		1,51	1,36	1,13	1,12

Fonte: Autora.

Tabela A5 – Módulo de elasticidade dinâmico, em Gpa.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	36,89	38,02	40,34	37,82
	CP2	37,28	37,61	39,20	38,73
	CP3	37,19	38,07	38,56	39,26
	CP4	38,25	36,36	39,46	38,31
	CP5	37,93	37,46	38,89	39,60
	CP6	37,02	36,67	37,92	39,14
	CP7	37,24	37,38	37,92	37,95
	CP8	37,49	37,53	38,44	38,76
	CP9	37,24	37,23	36,79	37,66
	CP10	37,79	36,33	36,85	38,71
	CP11	37,67	35,99	37,64	39,37
	CP12	37,90	37,22	38,06	39,12
	CP13	38,11	36,96	39,32	39,83
	CP14	37,23	36,42	38,73	39,06
	CP15	37,27			38,73
	CP16	37,18			
	CP17	37,27			
	CP18	36,47			
	CP19	37,16			
	Média	37,40	37,09	38,44	38,80
	Desvio padrão	0,44	0,65	1,00	0,64
C60-65	CP1	42,96	49,08	49,48	49,46
	CP2	43,30	48,34	47,32	49,62
	CP3	41,00	48,81	49,98	49,22
	CP4	42,21	47,54	49,01	48,23
	CP5	40,67	47,19	48,39	49,77
	CP6	41,98	47,65	47,64	48,18
	CP7	41,66	49,49	48,68	48,73
	CP8	42,56	48,02	48,66	48,99
	CP9	42,59	49,02	47,23	47,34
	CP10	42,81	48,33		
	CP11	40,46	49,07		
	CP12	42,67			
	CP13	41,17			
	CP14	42,27			
	CP15	42,15			
	CP16	41,55			
	Média	42,00	48,41	48,49	48,84
	Desvio padrão	0,84	0,75	0,95	0,80
C60-85	CP1	41,18	38,99	47,37	48,16

CP2	42,11	40,11	47,49	48,28
CP3	41,64	40,04	48,80	46,92
CP4	41,55	38,91	47,40	46,70
CP5	42,38	39,28	47,12	46,46
CP6	42,86	39,02	46,87	47,18
CP7	42,48	39,6	47,29	47,38
CP8	41,98	39,04	47,11	46,71
CP9	41,92	38,04	47,48	46,87
CP10	42,37	39,27	47,44	47,06
CP11	41,36	38,77	48,33	45,84
CP12	42,30	38,37	46,98	47,84
CP13	42,21	39,27	48,05	46,29
CP14	41,97	39,54	48,66	47,96
CP15	42,11			47,49
CP16	41,69			
CP17	42,40			
Média	42,03	39,16	47,60	47,14
Desvio padrão	0,44	0,57	0,62	0,71

Fonte: Autora.

Tabela A6 – Stiffness Damage Index.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)				
		0,0	0,05	0,12	0,3	
C30-85	CP1	0,124	0,014	0,057	0,094	
	CP2	0,083	0,061	0,094	0,083	
	CP3	0,101	0,106	0,117	0,080	
	CP4	0,092	0,073	0,100	0,086	
	CP5		0,092		0,094	
	Média		0,100	0,069	0,092	0,088
	Desvio padrão		0,018	0,035	0,025	0,006
C60-65	CP1	0,066	0,032	0,031	0,053	
	CP2	0,079	0,031	0,022	0,043	
	CP3	0,112	0,044	0,016	0,071	
	CP4	0,120	0,051	0,055		
	CP5	0,088				
	CP6	0,098				
	Média		0,094	0,039	0,031	0,055
Desvio padrão		0,020	0,010	0,017	0,014	
C60-85	CP1	0,065	0,078	0,039	0,031	
	CP2	0,039	0,048	0,043	0,037	
	CP3	0,038	0,056	0,030	0,047	
	CP4	0,052	0,067	0,058	0,057	
	CP5	0,028			0,053	
	CP6	0,034				

Média	0,043	0,062	0,043	0,045
Desvio padrão	0,013	0,013	0,012	0,011

Fonte: Autora.

Tabela A7 – Plastic Deformation Index.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	0,118	0,130	0,091	0,112
	CP2	0,128	0,084	0,141	0,078
	CP3	0,170	0,138	0,154	0,092
	CP4	0,116	0,145	0,120	0,161
	CP5				0,107
	CP6				0,123
	Média	0,133	0,124	0,127	0,112
	Desvio padrão	0,025	0,027	0,027	0,028
C60-65	CP1	0,050	0,017	0,074	0,021
	CP2	0,076	0,075	0,144	0,043
	CP3	0,068	0,037	0,031	0,114
	CP4	0,070			
	CP5	0,052			
	CP6	0,084			
	Média	0,067	0,043	0,083	0,060
	Desvio padrão	0,013	0,030	0,057	0,049
C60-85	CP1	0,026	0,074	0,059	0,048
	CP2	0,035	0,060	0,072	0,070
	CP3	0,075	0,089	0,070	0,088
	CP4	0,067	0,048		0,072
	CP5	0,057			
	CP6	0,064			
	Média	0,054	0,068	0,067	0,070
	Desvio padrão	0,019	0,018	0,007	0,016

Fonte: Autora.

Tabela A8 – Energia de fraturamento, em N/m.

Grupo	Amostra	Nível de expansão (%)			
		0,0	0,05	0,12	0,3
C30-85	CP1	160,69	251,89	205,50	196,96
	CP2	327,58	341,05	207,91	228,80
	CP3	222,98	346,74	199,17	203,73
	CP4	257,89	385,03	204,23	228,94
	CP5	282,73	252,28	182,68	280,44
	CP6	226,04	227,72	228,97	170,33
	CP7	287,95	215,86	257,07	230,59
	Média	252,26	288,65	212,22	219,97

	Desvio padrão	54,52	67,20	24,02	34,61
C60-65	CP1	270,82	288,80	225,93	272,29
	CP2	308,28	317,11	206,76	298,15
	CP3	304,21	355,89	198,49	288,76
	CP4	408,47	287,00	289,60	266,16
	CP5	208,00	293,14	300,10	276,43
	CP6		256,99	283,78	256,99
	Média	299,96	299,82	250,78	276,46
	Desvio padrão	72,74	33,49	45,43	14,99
C60-85	CP1	326,72	213,01	244,00	242,57
	CP2	326,56	197,10	204,99	244,20
	CP3	237,93	205,23	234,51	240,37
	CP4	269,40	213,04	245,73	206,09
	CP5	324,40	193,07	280,89	205,40
	CP6	325,77	222,08	231,70	
	CP7	366,60			
	Média	311,06	207,25	240,30	227,73
	Desvio padrão	42,91	10,91	24,68	20,12

Fonte: Autora.

APÊNDICE B – Gráficos de expansão longitudinal e de massa

Figura B1 – Gráfico de variação dimensional e de massa do concreto C30-85

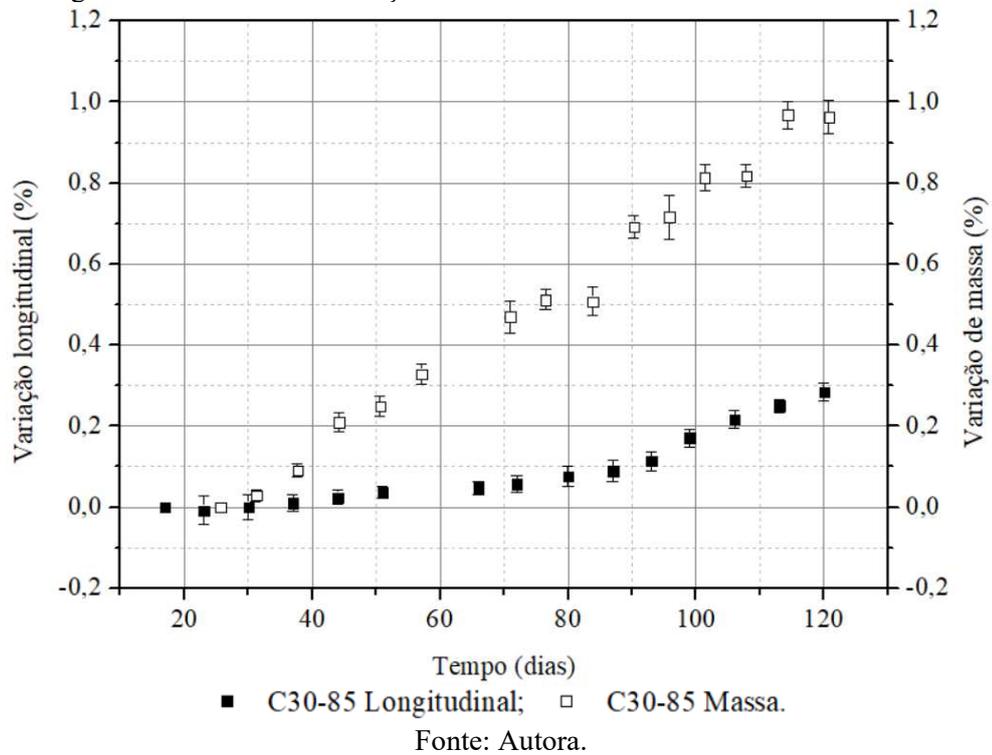


Figura B2 – Gráfico de variação dimensional e de massa do concreto C60-65

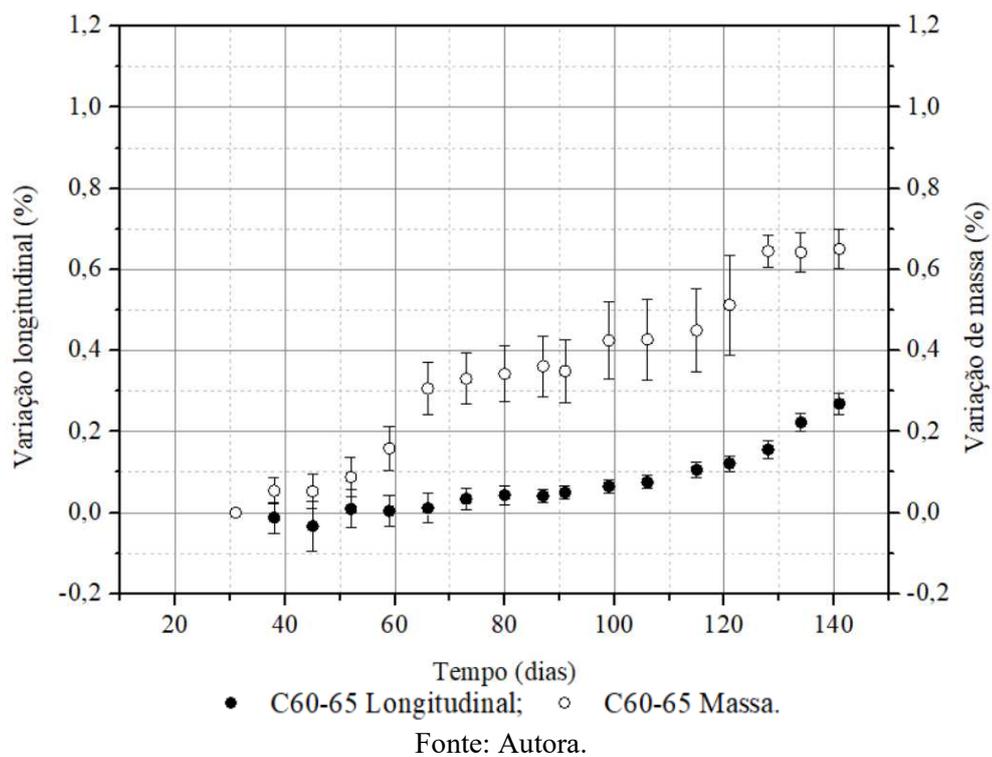
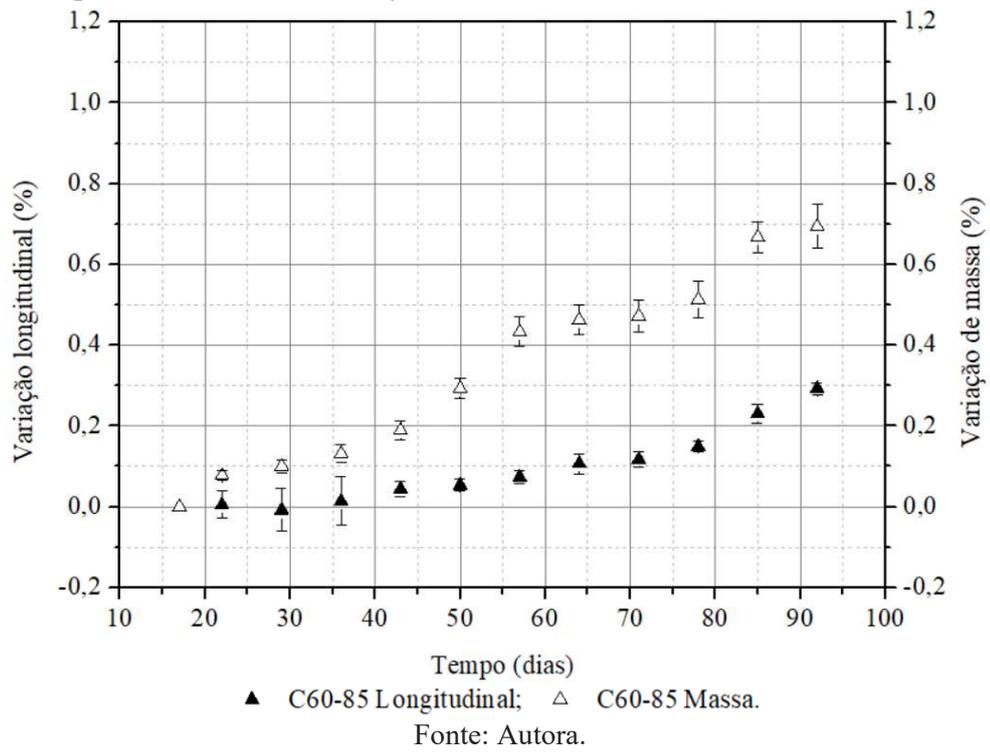


Figura B3 – Gráfico de variação dimensional e de massa do concreto C60 85



APÊNDICE C – Análise visual das amostras

Figura C1 - Fissuras no concreto C30-85, 0,12% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C2 - Fissuras no concreto C30-85, 0,3% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C3 - Poros com material esbranquiçado no concreto C30-85, 0,12% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C4 - Poros com material esbranquiçado no concreto C30-85, 0,3% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C5 - Fissuras no concreto C60-65, 0,05% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C6 - Fissuras no concreto C60-65, 0,12% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C7 - Fissuras no concreto C60-65, 0,3% de expansão



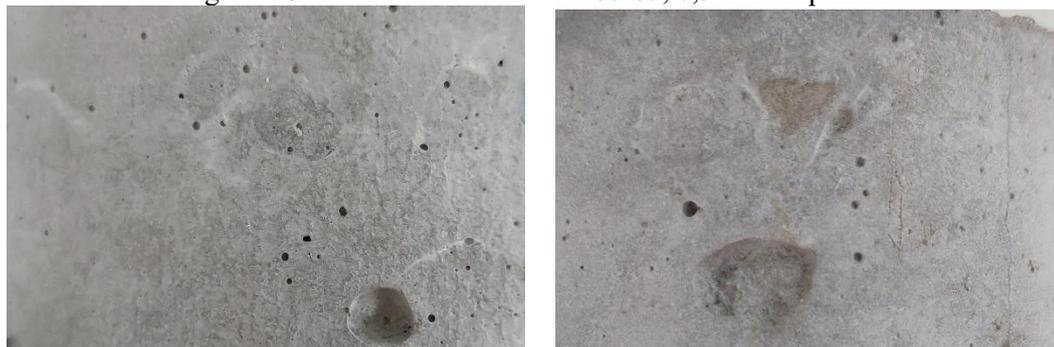
Fonte: Autora.

Figura C7 - Fissuras no concreto C60-85, 0,12% de expansão



Fonte: Autora.

Figura C8 - Fissuras no concreto C60-85, 0,3% de expansão



Fonte: Autora.